

# Trabajo Fin de Grado

Evaluación ambiental en tratamiento de aguas por  
fotocatálisis de  $\text{TiO}_2$  para la degradación de  
antibióticos.

Autor

**Pedro Merino Matute**

Directora

**Rosa Mosteo Abad**

Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente

Codirector

**Jorge Sierra Pérez**

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021



## RESUMEN

### **Evaluación ambiental en tratamiento de aguas por fotocátalisis de TiO<sub>2</sub> para la degradación de antibióticos.**

Actualmente y tras la publicación de la Directiva 91/271/CEE, hace más de 25 años, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, y una vez que se han alcanzado los requisitos mínimos establecidos, es necesario avanzar en los tratamientos que se llevan a cabo en las depuradoras de aguas residuales urbanas (EDARs) para mejorar la calidad del agua depurada y así minimizar los efectos en el medio receptor. Las EDARs no se diseñan con el objetivo de eliminar contaminación microbiológica o compuestos orgánicos en bajas concentraciones habitualmente refractarios a los tratamientos convencionales utilizados en las instalaciones de depuración. Estos compuestos orgánicos suelen definirse como contaminantes emergentes, dentro de los cuales se encuentran los productos farmacéuticos. En este trabajo fin de titulación se seleccionan varios antibióticos, habitualmente detectados en las aguas residuales urbanas, como contaminantes objeto de estudio.

Los procesos de oxidación avanzada (POA), procesos que se basan en la generación de especies radicalarias capaces de oxidar la mayoría de la contaminación tanto orgánica como microbiológica, se están postulando como una buena alternativa para eliminar la contaminación que todavía está presente en las aguas residuales urbanas depuradas, ubicándose al final de la línea de tratamiento de aguas de la instalación como tratamiento terciario o de afino. Estos procesos se pueden utilizar aislados o combinados con algún otro proceso convencional que mejore alguna característica de la depuración. En este Trabajo Fin de Grado, se selecciona como tratamiento el proceso de fotocátalisis heterogénea con dióxido de titanio (POA) y su combinación con el proceso de adsorción con carbón activo en polvo.

Una vez analizado a escala de laboratorio la efectividad de un POA para eliminar el contaminante objeto de estudio, es de elevado interés pasar a analizar el proceso a escala piloto y determinar, además de las condiciones de operación más adecuadas para reducir dichos contaminantes, el impacto ambiental asociado a dicha instalación en línea con los objetivos de desarrollo sostenible.

En este TFG se evalúa la viabilidad ambiental de una planta a escala piloto compuesta por un proceso de fotocátalisis y adsorción mediante la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Para ello se ha realizado un análisis de inventario de todas las entradas y salidas existentes en el sistema analizado en la planta piloto de tratamiento para la degradación de antibióticos situada en Tudela (Navarra). Para ello, mediante visitas, se han tomado datos de consumos eléctricos, listado las materias primas involucradas en el proceso, así como a través de la consulta del proyecto de construcción de la planta piloto para determinar todos los componentes de la planta, sus características técnicas y físicas. Toda la información del inventario se ha caracterizado ambientalmente utilizando bases de datos como Ecoinvent, permitiendo conocer

las implicaciones ambientales del proceso según diferentes categorías de impacto. Los resultados indican la gran influencia que tiene la construcción de la instalación de tratamiento de agua, siendo la etapa de almacenamiento previo al tratamiento la más relevante. El consumo energético del tratamiento se limita a la electricidad utilizada por los sistemas de bombeo, siendo procesos rápidos, a las dos agitadoras y al proceso de aireación y fotocátalisis. Para el futuro escalado a una planta industrial se han propuesto mejoras de eco diseño del proceso de tratamiento o de su construcción para intentar minimizar los impactos ambientales.

El presente Trabajo Fin de Grado se ha desarrollado en el grupo de investigación Agua y Salud Ambiental, grupo de referencia reconocido por el Gobierno de Aragón. La investigación se desarrolla en el marco del proyecto europeo OUTBIOTICS perteneciente al programa Interreg POCTEFA.

## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer a NILSA por darme la oportunidad de realizar el Trabajo Fin de Grado en una planta piloto. También quiero dar las gracias a todas las personas que componen el grupo de investigación Agua y Salud Ambiental, en especial a mi directora Rosa Mosteo Abad y a mi codirector Jorge Sierra Pérez. Mencionar a mi familia, a mi madre, a mi padre, a mis hermanos, a mi tía, a mis dos abuelas, a mi pareja y a su familia, ya que ha sido un año muy complicado para todos. Y sobre todo agradezco a mi abuelo todo su apoyo y le dedico este Trabajo Fin de Grado.



# ÍNDICE

---

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	5
<b>2.1 Descripción del caso de estudio: Planta Piloto</b> .....	5
<b>2.2 Análisis del Ciclo de Vida (ACV)</b> .....	9
<b>2.2.1 Definición de objetivos y alcance</b> .....	9
<b>2.2.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)</b> .....	9
<b>2.2.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)</b> .....	9
<b>2.2.4 Metodología para la interpretación de resultados</b> .....	10
<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	11
<b>3.1 Diagramas de SANKEY</b> .....	11
<b>3.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)</b> .....	17
<b>3.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)</b> .....	18
<b>3.4 Posibles mejoras para el paso a escala industrial</b> .....	22
<b>CONCLUSIONES</b> .....	24
<b>REFERENCIAS</b> .....	26
<b>ANEXOS</b> .....	1
<b>ANEXO 1. Planta Piloto</b> .....	1
<b>1.1 Equipos de la Planta Piloto</b> .....	1
<b>1.2 Equipos de bombeo</b> .....	4
<b>1.3 Productos utilizados en el proceso</b> .....	4
<b>ANEXO 2. Consumo Eléctrico y de Materias Primas</b> .....	5
<b>2.1 Consumo eléctrico</b> .....	5
<b>2.2 Consumos de materias primas</b> .....	5
<b>ANEXO 3. Análisis del Ciclo de Vida</b> .....	8
<b>3.1 ICV</b> .....	8
<b>3.2 EICV</b> .....	10





# 1. INTRODUCCIÓN

---

El planeta Tierra dispone de 1.386 millones de kilómetros cúbicos de agua, de los cuales el 97,5% es agua salada, es decir, solo 2,5% es agua dulce (35 millones de kilómetros cúbicos). De esa cantidad, solo el 0,007% del total está disponible para consumo humano, debido a que el 69,7% del agua dulce está congelada en los polos o en los glaciares, el 30% está enterrada bajo la superficie en acuíferos y el 0,3% en los ríos y los lagos. Evitar que el agua se contamine es muy importante para la sociedad. Debido a la baja disponibilidad de agua dulce, si no se lleva a cabo una buena depuración, el recurso se hace todavía más escaso. De hecho, según la UNESCO [1], el 80% de las aguas residuales vuelven al ecosistema sin ningún tipo de tratamiento [2] [3].

La incorporación al ordenamiento jurídico español de la Directiva 91/271/CEE [4] relativa al tratamiento de aguas residuales urbanas, cuyo objetivo es proteger al medio ambiente de los efectos negativos de los vertidos de las aguas residuales, supuso la construcción de numerosas Estaciones Depuradoras de aguas residuales urbanas (EDARs) en España. La mayor parte de las EDARs, con el fin de reducir la contaminación, constan de un pretratamiento, un tratamiento primario y un tratamiento biológico, los cuales aseguran una calidad del vertido final que se adecúa a los límites permitidos por la legislación vigente. En algunas EDARs también puede haber tratamientos terciarios para mejorar la calidad del agua [5].

El objetivo de este tratamiento terciario es mejorar la calidad del efluente de salida una vez realizado el tratamiento primario y biológico en la EDAR y así minimizar aún más el impacto asociado al efluente en el medio receptor. En algunas ocasiones las aguas depuradas pueden ser objeto de reutilización, en línea con la economía circular, para lo cual también suele ser necesario el uso de tratamientos terciarios. El Real Decreto 1620/2007 [6] regula la reutilización de las aguas residuales depuradas y establece normas de calidad. En el Real Decreto aparece un nuevo término denominado aguas regeneradas, siendo estas, aguas residuales depuradas que han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional como es el caso del abordado en este Trabajo Fin de Grado [7].

Los procesos más habituales utilizados en depuración de aguas, son procesos físicos, químicos y biológicos. En determinadas ocasiones con estos procesos no es suficiente para conseguir la calidad de agua requerida para un uso determinado. Debido a esto, durante los últimos años se han comenzado a implementar los procesos de oxidación avanzada (POA) para la minimización de los impactos causados en los recursos hídricos por los vertidos de aguas residuales, como una alternativa tecnológicamente viable y novedosa para el tratamiento de los efluentes. Los POA consisten básicamente en la formación de radicales hidroxilo ( $^{\circ}\text{OH}$ ) altamente oxidantes, con un potencial de oxidación  $E = 2.8 \text{ V}$ , el cual es mayor que el de otros oxidantes tradicionales (ozono,  $2.07 \text{ V}$ ; peróxido de hidrógeno,  $1.78 \text{ V}$ ; dióxido de cloro,  $1.57 \text{ V}$ , y cloro,  $1.36 \text{ V}$ ). Dichos radicales

hidroxilos contribuyen a la mineralización total de los compuestos contaminantes presentes en las aguas residuales y se encargan de la eliminación de compuestos orgánicos como antibióticos [8]. Entre ellos cabría destacar tratamientos con ozono, procesos basados en Fenton, electro-oxidación y fotocátalisis.

La fotocátalisis consiste en la aceleración de una fotorreacción (absorción de la luz) mediante un catalizador como material semiconductor. Es necesaria la activación del catalizador mediante radiación ultravioleta con las longitudes de onda adecuadas.

Existen dos tipos de fotocátalisis: heterogénea y homogénea.

- La **fotocatálisis heterogénea** es aquella en la que se utilizan materiales semiconductores sólidos (sólidos en suspensión acuosa o gaseosa) como fotocatalizadores al aplicarse luz sobre ellos, lo que genera pares de electrón-hueco [9]. La velocidad de la reacción dependerá de la capacidad del fotocatalizador para crear los pares de electrón-hueco. Existen múltiples catalizadores ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ), pero el más usado es el dióxido de titanio [10] ( $\text{TiO}_2$ ) en forma de anatasa (99%) y rutilo (1%) ya que presenta una mayor actividad fotocatalítica, no es tóxico, es estable en soluciones acuosa y no es costoso (Figura 1). Además de anatasa y rutilo puede aparecer en la naturaleza de otra forma cristalina denominada brookita [11]. La principal diferencia entre el dióxido de titanio anatasa y el dióxido de titanio rutilo es que presentan diferentes estructuras cristalinas y además el dióxido de titanio rutilo tiene una apariencia de color rojo intenso, mientras que la apariencia del dióxido de titanio anatasa es incoloro o blanco [12]. Cuanto mayor sea la dosis del catalizador, mayor será en principio la eficiencia obtenida, si bien el efecto de la turbidez ocasionada por sus partículas también aumenta, dificultando la difusión de la luz ultravioleta. En lo que respecta a su disposición, el dióxido de titanio puede estar en suspensión o inmobilizado.

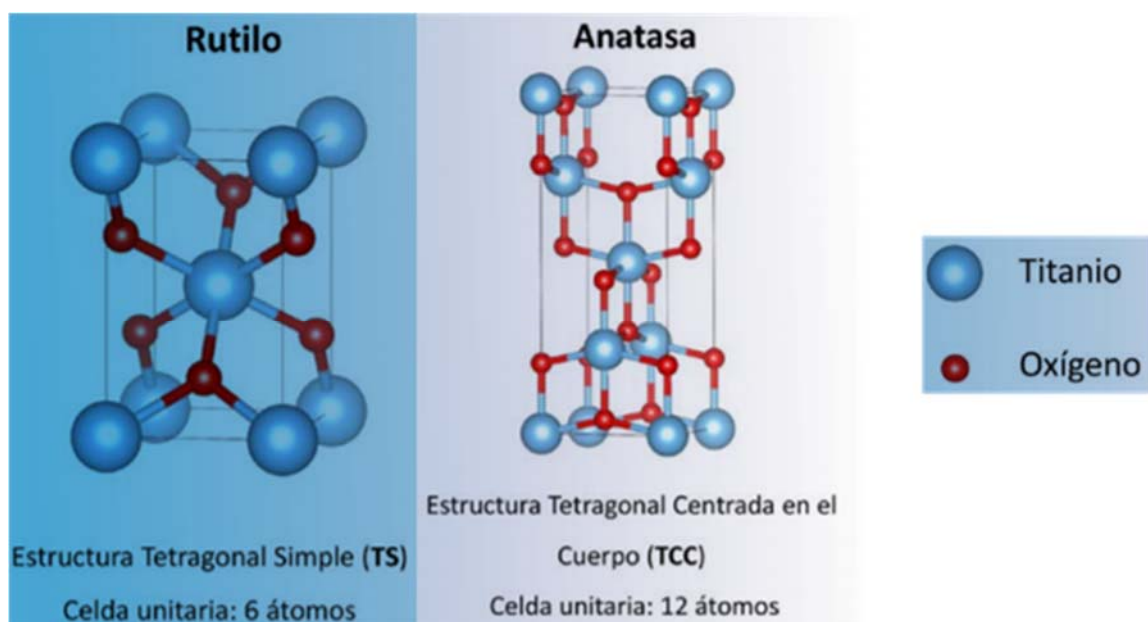


Figura 1. Composición Dióxido de Titanio.

- La **fotocatálisis homogénea** se basa principalmente en el proceso Foto-Fenton [13]. Su descubridor fue Henry John Horstman Fenton (1854-1929) en 1894, ingeniero químico británico. Se produce al hacer reaccionar el peróxido de hidrogeno con sales ferrosas. Hay que tener en cuenta que el pH debe ser ácido, para así formar los radicales hidroxilos a temperaturas moderadas [7].

Los procesos de oxidación avanzada (POA) se pueden utilizar de forma aislada o combinados con procesos convencionales. El proceso de adsorción con carbón activo en polvo (PAC) es un tratamiento que permite mejorar el rendimiento de eliminación de ciertos compuestos disueltos y no disueltos en el agua como consecuencia de la adsorción de estas sustancias sobre el sólido adsorbente.

La adsorción es una operación de separación que consiste en poner el agua en contacto con un sólido adsorbente sobre el cual quedan fijados los contaminantes [14]. La sustancia que se adsorbe, es decir que se pega en la superficie es el adsorbato, y la superficie sobre la que sucede la adsorción es el adsorbente [15]. En este caso el carbón activo (PAC) es el adsorbente y los antibióticos son el adsorbato. Por tanto, al quedar pegado el adsorbato al adsorbente, conseguiremos una mejor calidad del agua de salida. En la figura 2 [16] se puede observar el proceso de adsorción, dónde como ya se explicado, el adsorbato queda adherido al adsorbente.



Figura 2. Proceso de adsorción.

En esta investigación se propone el uso de un tratamiento combinado y compuesto por un proceso fotocatalítico basado en dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y adsorción con carbón activo en polvo (PAC) para el tratamiento de aguas residuales depuradas en las que se quiere reducir la concentración de antibióticos presentes en dichas aguas. Este proceso combinado se realiza para terminar el tratamiento del agua residual urbana tratada previamente mediante otros tratamientos en la EDAR y así mejorar la calidad del agua del efluente tratado eliminando la mayor cantidad de antibióticos posible. El tratamiento objeto de estudio se encuentra en funcionamiento a escala piloto en la EDAR de Tudela como consecuencia del desarrollo del proyecto OUTBIOTICS perteneciente al programa Interreg-POCTEFA, en el que participa el grupo de investigación Agua y Salud Ambiental.

Una vez analizado a escala laboratorio la efectividad de un tratamiento para eliminar el contaminante objeto de estudio, es de elevado interés pasar a analizar el proceso a escala piloto y determinar, además de las condiciones de operación más adecuadas para reducir dichos contaminantes, el impacto ambiental asociado a dicho proceso.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología de evaluación ambiental bastante desarrollada utilizada para analizar de forma objetiva y metódica los impactos ambientales que se generan a lo largo de toda la vida de un producto o proceso y así poder determinar las implicaciones ambientales de realizar dicho producto o proceso, identificando las etapas más relevantes que permitirán proponer cambios en el diseño del mismo para su minimización o eliminación [17]. En el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), se incluye el diseño de Inventario del Ciclo de Vida (ICV) con todos los inputs en forma de consumo energético, uso de materias primas, cargas de transporte, ... y outputs en forma de emisiones locales, generación de residuos, ... de cada fase del proceso de tratamiento del agua, y posteriormente la realización de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) utilizando bases de datos de información ambiental. Finalmente se procederá a la interpretación de resultados realizando diagramas y gráficas en las que se podrá observar cual es la categoría de impacto más relevante y en qué etapa o subetapa del proceso ocurre. A su vez, la determinación de estos impactos ambientales con la Evaluación del Análisis del Ciclo de Vida permite obtener los resultados necesarios para comprobar si sería posible el paso de escala piloto a escala industrial, puesto que a mayor escala mayor es la posibilidad de que el impacto ambiental sea más elevado.

El objetivo de estudio del presente Trabajo Fin de Grado es realizar el estudio de las implicaciones ambientales en la degradación de antibióticos mediante un proceso combinado de fotocatalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  y de adsorción con carbón activo en polvo (PAC) a escala piloto, a través de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y compararlo con otros estudios con el fin de disponer de otro resultado adicional que permita tomar decisiones en cuanto a la puesta en marcha de un tratamiento de aguas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción del caso de estudio: Planta Piloto.

Para realizar el ACV se debe conocer el proceso sobre el que vamos a trabajar. En este caso se tiene el esquema de la planta piloto sobre la que se trabaja en este TFG. La planta piloto está situada en la EDAR de Tudela y ha sido diseñada por NILSA con la colaboración del Grupo de investigación Agua y Salud Ambiental de la Universidad de Zaragoza [18] [19].

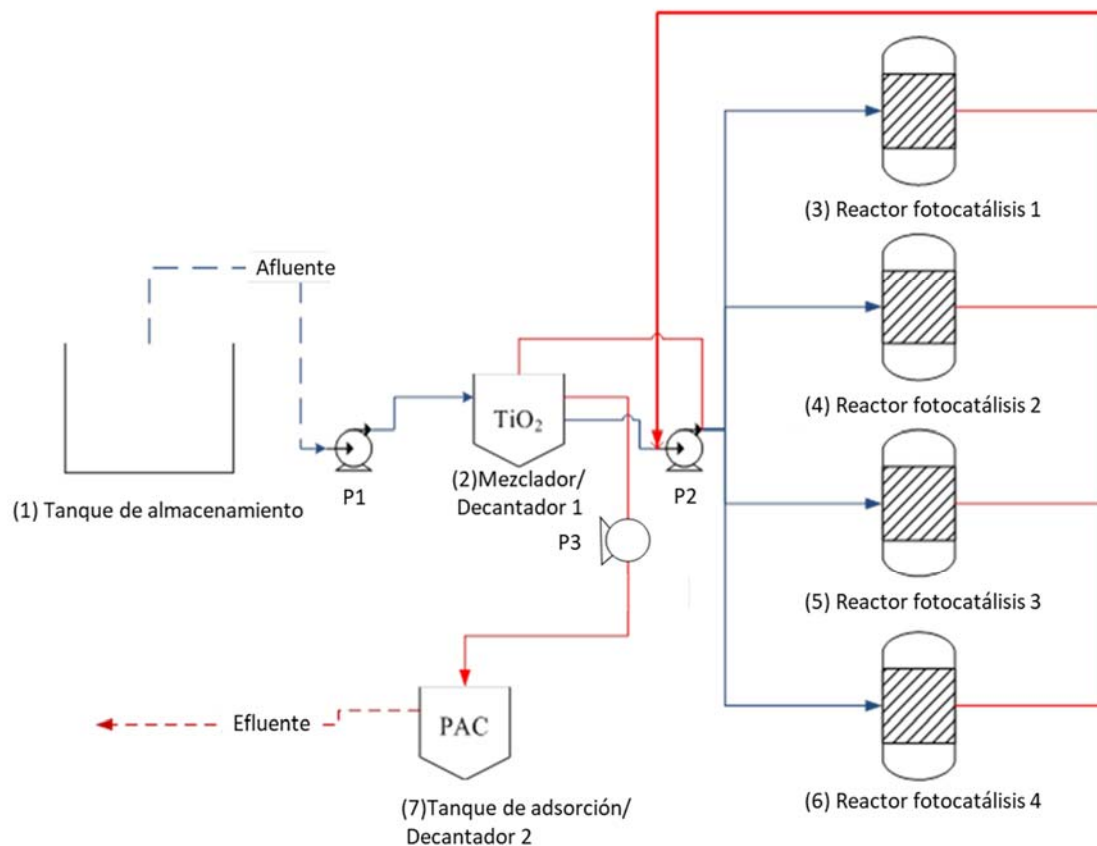


Figura 3. Diagrama de proceso de la planta piloto.

El agua a tratar en la instalación es un agua residual depurada en la EDAR de Tudela. El agua cumple con la normativa relativa a depuración de aguas residuales urbanas, pero todavía contiene contaminación a nivel traza que quiere ser eliminada o reducida mediante el tratamiento que se propone en este Trabajo Final de Grado.

El agua se encuentra a temperatura ambiente y se almacena en el tanque de almacenamiento (1). Mediante una bomba (P1), se realiza el llenado del mezclador/decantador 1 (2) con el agua de salida del tanque de almacenamiento. El mezclador/decantador 1, primero funcionará como mezclador y más adelante como decantador. En el mezclador, se incorpora el dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), que actuará como catalizador, y se mezcla usando un agitador durante 5 minutos a máxima velocidad (1340 rpm) junto con el agua residual urbana tratada que viene del tanque

de almacenamiento (1). Realizada la mezcla, se produce el vaciado del mezclador/decantador 1 y el posterior llenado de los reactores de fotocátalisis (3,4,5,6) mediante otra bomba (P2). Hay cuatro reactores, cada uno con una lámpara propia, cuyo funcionamiento es de 2h seguidas como máximo en un ciclo y un total de 12h al día, es decir cada reactor trabaja 2h en las que las luces permanecen encendidas y cuando se apagan las luces, el agua pasa al siguiente proceso. En dichos reactores necesitamos que exista presencia de oxígeno, por tanto, hay aireación en los 4 reactores. En este paso se eliminan entre el 80% y el 100% de los antibióticos.

Terminada la fotocátalisis en los reactores (3,4,5,6), se usa de nuevo la bomba (P2) para el vaciado de los reactores y el llenado de nuevo del mezclador/decantador 1 (2). Lo que se pretende conseguir es que el  $TiO_2$  decante, para así conseguir una buena separación del agua y el  $TiO_2$ . Una vez terminado el llenado del mezclador/decantador 1 (2), se produce la coagulación durante 5 minutos a máxima velocidad (1340 rpm), la floculación durante 30 minutos al 25% de velocidad (335rpm). y para terminar este paso se produce la decantación durante 1 hora 25 minutos.

En la decantación, todo el dióxido de titanio se irá al fondo del decantador, para ser reutilizado en el siguiente ciclo. Se deberá reponer para el siguiente ciclo un 10 % de  $TiO_2$ , ya que puede haber pérdidas y se estima que la reutilización es del 90%.

Finalizada la decantación se bombea el agua ya separada del  $TiO_2$  a otro decantador, que actúa como un tanque de adsorción (7) mediante una tercera bomba (P3). En dicho tanque de adsorción se añade carbón activo (PAC) como adsorbente, para terminar con la eliminación de los antibióticos que todavía permanecen en el agua tras el proceso de fotocátalisis en los reactores (3,4,5,6). En el tanque de adsorción (7) tiene lugar el mismo proceso que en el mezclador/decantador 1 (2) (coagulación-floculación-decantación) pero con una agitación previa durante 30 minutos para mezclar el efluente que viene del decantador junto con el PAC y se eliminará entre el 0% y el 20% restante de antibióticos. La función del PAC que actúa como adsorbente consiste en retener los antibióticos, y esto se realiza ya que los antibióticos quedan adheridos al PAC, por tanto, al producirse la decantación en el tanque de adsorción, el PAC junto con los antibióticos que se han adherido a él, se van al fondo de dicho tanque y se obtiene un efluente de salida sin antibióticos. En este proceso final de adsorción, se añade un coagulante a la mezcla (cloruro de hierro, 50 mg/l).

En la decantación, todo el PAC que se irá al fondo del decantador, es reutilizado en el siguiente ciclo. Se deberá reponer para el siguiente ciclo un 10 % de  $TiO_2$ , ya que puede haber pérdidas y se estima que la reutilización es del 90%. Finalizado todo el proceso, se descarga el decantador final mediante una válvula automatizada y se obtienen muestras que se llevan al laboratorio.

*En el ANEXO 1 se amplía información de la planta piloto.*

En la figura 4 se pueden observar todos los pasos del proceso de la planta piloto. Los pasos de llenado o vaciado se deben realizar de acuerdo a unos niveles predeterminados de altura para así realizar todos los ciclos de manera uniforme y economizar lo máximo el proceso, es decir en cada llenado se bombeará agua hasta el nivel de altura estipulado y en cada vaciado se descargará agua también hasta el nivel de altura estipulado.

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| ➤ Llenado decantador 1                      | → Nivel de llenado hasta 0,40 metros. |
| ➤ Llenado depósitos catalizadores (Reactor) | → Nivel de llenado hasta 1,10 metros. |
| ➤ Vaciado depósitos catalizadores (Reactor) | → Nivel de vaciado hasta 0,05 metros. |
| ➤ Llenado decantador 1                      | → Nivel de llenado hasta 0,40 metros. |
| ➤ Vaciado decantador 1                      | → Nivel de vaciado hasta 0,14 metros. |
| ➤ Llenado decantador 2                      | → Nivel de llenado hasta 0,40 metros. |
| ➤ Vaciado decantador 2                      | → Nivel de vaciado hasta 0,14 metros. |

La agitación previa en el tanque de almacenamiento se realiza para mezclar el agua residual urbana tratada almacenada, pero supone un coste eléctrico tan bajo que no lo tendremos en cuenta. Respecto a la primera agitación del decantador 1 cuando actúa como mezclador, es más rápida (5 minutos) que otras agitaciones debido a razones económicas y de reducción de tiempos.

La fotocatalisis producida en los reactores debe estar aireada y supone un tiempo de 2 horas, es el proceso más largo, ya que ahí es donde se elimina gran parte de los antibióticos.

El proceso de coagulación-floculación-decantación de ambos decantadores es el ya explicado anteriormente para la figura 3.

La cronología del proceso (figura 4) se divide en dos partes:

- El proceso realizado desde el inicio hasta que se produce la decantación en el decantador 1. (Proceso de fotocatalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$ )
- El proceso realizado en el decantador 2 o tanque de adsorción. (Proceso de adsorción con carbón activo en polvo (PAC))

En la figura 4 se puede ver claramente la división en dos partes comentada anteriormente y debido a esto se habla de un proceso combinado de dos tratamientos. Esta división en dos partes del proceso es una ventaja porque se puede realizar tanto la primera parte únicamente, como la primera parte junto con el proceso final de adsorción. En el caso de este Trabajo Final de Grado se centra en el proceso combinado de ambos.

Existen además válvulas automatizadas en cada fase del proceso por si fuese necesario evacuar parte del agua residual urbana tratada y también para tomar muestras de cada fase del proceso si es necesario realizar alguna prueba de control de calidad. Estas válvulas automatizadas no son la única vía de salida del agua residual urbana tratada, también hay válvulas manuales, cuyo uso se da cuando el catalizador ( $\text{TiO}_2$ ) o el adsorbente (PAC) se convierten en residuos y debemos desecharlos.

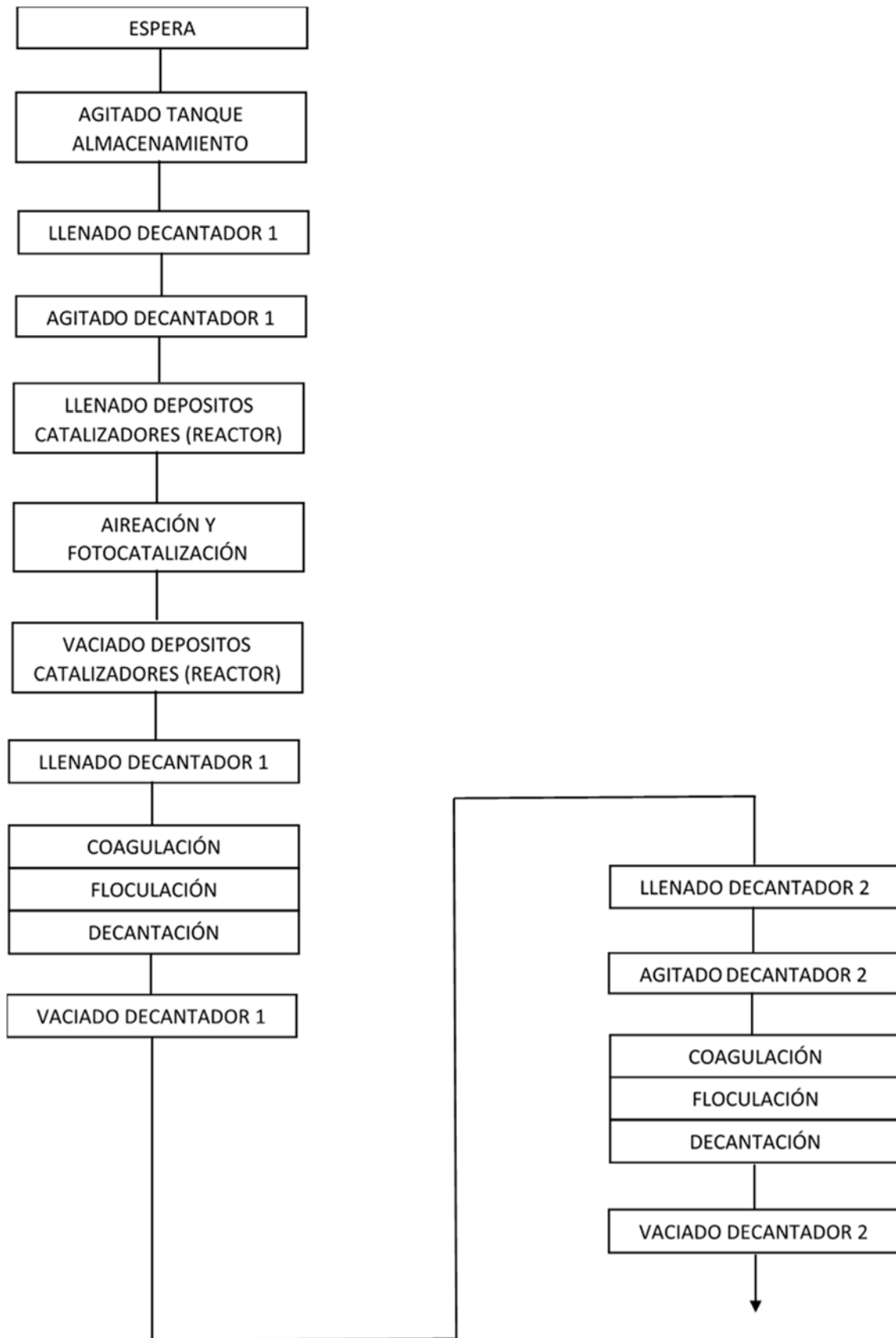


Figura 4. Cronología del proceso combinado de fotocatalisis y adsorción.



## 2.2 Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

El análisis del ciclo de vida (ACV) como ya se introdujo en la introducción del Trabajo Fin de Grado, es la técnica más extendida que se utiliza para medir los impactos ambientales causados por un producto o proceso a lo largo de toda su vida. Se caracteriza porque utiliza un enfoque holístico, es decir, es necesario valorar todos los aspectos que influyen en el ACV de manera global, no puede realizarse de manera individual [20].

La norma UNE-EN ISO 14040:2006 [21] (Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia) define el análisis del ciclo de vida como una técnica para visualizar los impactos ambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida mediante 3 fases (figura 5 [20]) [17]:



Figura 5. Esquema ACV según ISO 14040:2006

### 2.2.1 Definición de objetivos y alcance.

Se define el objetivo y alcance del estudio previsto de acuerdo a la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida.

### 2.2.2 Inventario del Ciclo de Vida (ICV)

Consiste en recopilar las entradas (inputs) y salidas (outputs) más relevantes del proceso a lo largo de toda su vida de manera cualitativa y cuantitativa [20].

- Inputs/Entradas: Hace referencia a las materias primas, los recursos y productos, el transporte y la energía utilizada.
- Outputs/Salidas: Hace referencia a las materias primas, residuos y subproductos, así como las emisiones generadas.

### 2.2.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

Las entradas y salidas del ICV, se transforman en indicadores de potenciales, clasificando las entradas y salidas en diferentes categorías de impactos ambientales [20]. Se puede hacer con diferentes métodos y en este caso se van a utilizar el método ReCiPe y el método Cumulative Energy Demand (CED). Se han obtenido todos los datos de información ambiental de la base de datos Ecoinvent [22].

El método ReCiPe consta de 18 categorías de impacto (ANEXO 3) de las cuales se escogerán las más relevantes para el objetivo y alcance del estudio. En este Trabajo Fin de Grado, se han escogido como categorías de impacto principales 4 de las 18 posibles, las cuales se explican a continuación [23]:

- **GWP (Global Warming Potential):** Hace referencia al cambio climático y nos da como resultado los kg de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalentes lo cual es muy importante conocer cuando estamos realizando un proceso medioambiental.
- **FEP (Freshwater Eutrophication):** Eutrofización de agua dulce; nos da como resultado los kg de fósforo (P) equivalentes. Se ha escogido esta categoría de impacto porque estamos trabajando con agua dulce y la eutrofización es el proceso por el cual, debido al exceso de nutrientes en el agua (nitrógeno y fósforo), las plantas (algas) y otros microorganismos crecen en abundancia lo que disminuye la calidad del agua [24].

- **MDP (Metal Depletion):** Agotamiento de metales; nos da como resultado los kg de hierro (Fe) equivalentes. Se ha escogido esta categoría de impacto porque estamos trabajando en el proceso con metales.
- **FETPinf (Freshwater Ecotoxicity):** Eco toxicidad de agua dulce; nos da como resultado los kg 1,4-Diclorobenceno equivalentes. Se ha escogido esta categoría de impacto porque estamos trabajando con agua dulce y es de relevante importancia la toxicidad.

El método CED calcula los impactos ambientales según el uso de energía por proceso haciendo referencia tanto a si es energía renovable o no renovable, para finalmente expresarla de forma agregada o separada por tipo de energía. En el presente Trabajo Fin de Grado la presentaremos de forma agregada debido a razones de espacio.

#### 2.2.4 Metodología para la interpretación de resultados

De acuerdo al objetivo propuesto se interpretan los resultados obtenidos en la evaluación del impacto del ciclo de vida, y se establecen conclusiones. Para ello se realizan gráficas y comparaciones con el fin de obtener en que parte del proceso se encuentra el mayor impacto ambiental y por qué. A su vez existe otra norma, UNE-EN ISO 14044:2006 [25] (Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices) para el Análisis del Ciclo de Vida [26].

El objetivo del ACV puede ser diferente en función de los objetivos marcados, y los más habituales son los siguientes [20]:

- De la puerta a la puerta (Gate to gate): Tiene en cuenta únicamente el proceso productivo de la empresa.
- De la cuna a la puerta (Cradle to Gate): Considera el proceso desde la obtención de las materias primas hasta el proceso productivo de la empresa.
- De la puerta a la tumba (Gate to grave): Considera el proceso productivo de la empresa, incluyendo además la gestión de los residuos.
- De la cuna a la tumba (Cradle to grave): Considera el proceso desde la obtención de las materias primas hasta la gestión de los residuos.
- De la cuna a la cuna (Cradle to cradle): Abarca el uso completo del ciclo de vida del producto.

En el caso del presente Trabajo Fin de Grado, el enfoque u objetivo marcado es de la cuna a la puerta.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

### 3.1 Diagramas de SANKEY

Un diagrama de SANKEY es un diagrama de flujo en el que se representan las entradas y salidas de un proceso mediante flechas de diferentes colores y grosores, en dónde dicho grosor de flecha hace referencia a la cantidad de flujo.

En este Trabajo Fin de Grado, se realizan diferentes diagramas de SANKEY para cada ciclo del proceso, en dónde variarán los inputs y outputs y también los grosores de las flechas de flujo utilizadas, que sirven para visualizar la relevancia en peso o kWh de cada uno de los inputs/outputs con respecto al resto.

La planta piloto en la cual se realiza el proceso combinado de fotocátalisis con  $\text{TiO}_2$  y adsorción con PAC, se mide en ciclos llevándose a cabo un ciclo al día. En este caso vamos a realizar los diagramas de SANKEY para 8 ciclos diferentes, puesto que la duración del catalizador hasta que se convierte en residuo es de 8 ciclos, es decir el dióxido de titanio se añade primero en el ciclo 1 y se va reutilizando hasta el ciclo 8 dónde al convertirse en residuo, deja de poder ser reutilizado. A su vez la duración del carbón activo (PAC) hasta convertirse en residuo es de 4 ciclos, es decir la mitad de la duración del  $\text{TiO}_2$ . Por tanto, debido a la duración del catalizador se ha tomado para la realización de los cálculos 8 ciclos, puesto que el ciclo 9 volvería a ser igual que el ciclo 1, ya que como se ha comentado en el octavo ciclo tanto el  $\text{TiO}_2$  como el PAC se han convertido en residuo (el PAC por segunda vez) y en el ciclo 9 se volverá a añadir toda la cantidad inicial de ambos.

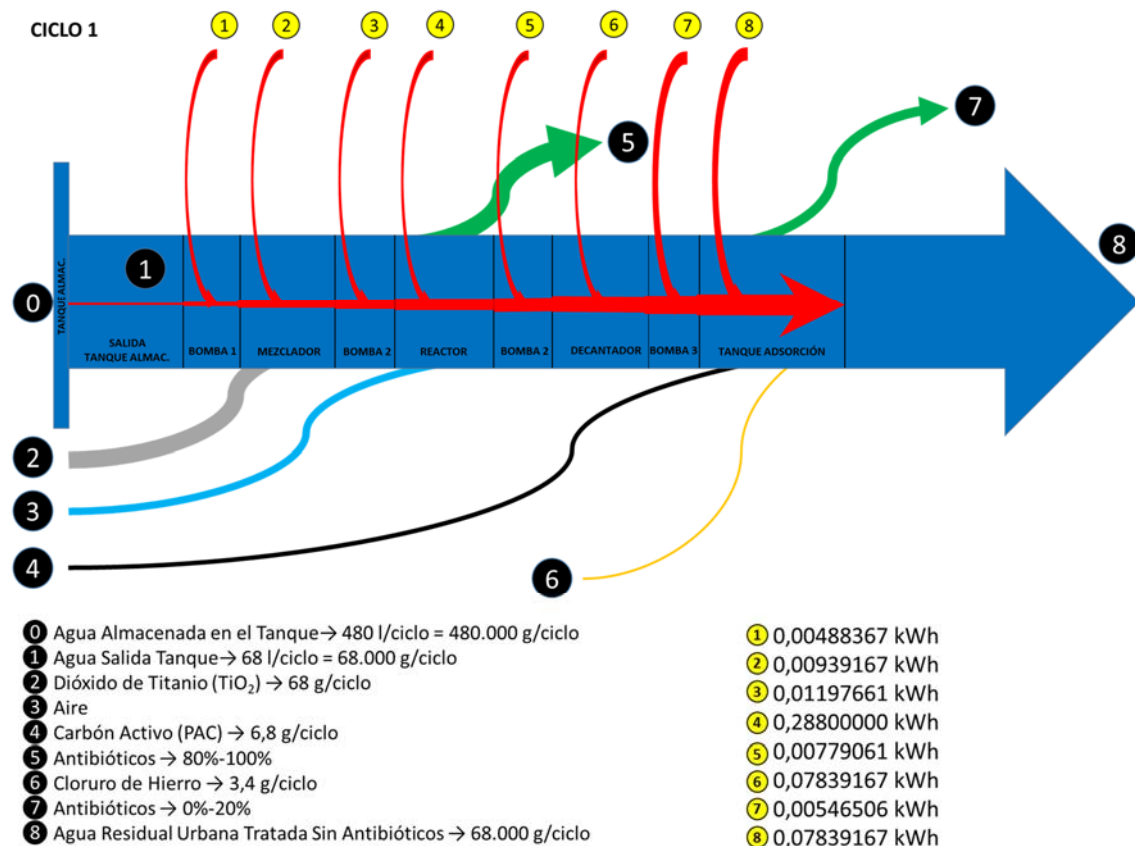
Como ya se comentó anteriormente en el apartado 2.1, hay que reponer tanto el  $\text{TiO}_2$  como el PAC en un 10% en cada ciclo ya que la reutilización de ambos no es perfecta, sino que puede haber pérdidas durante el proceso, excepto en los ciclos siguientes al 4 (PAC se convierte en residuo) y al 8 ( $\text{TiO}_2$  y PAC se convierten en residuo) dónde anteriormente se ha convertido en residuo y por tanto hay añadir de nuevo toda la cantidad de  $\text{TiO}_2$  o de PAC (la que corresponda en cada caso).

*En el ANEXO 2 se amplía información del consumo eléctrico y de las materias primas.*

## CICLO 1

El primer ciclo comienza con 480 l de agua almacenada (0) en el tanque de almacenamiento, del cual salen 68 l de dicha agua (1), sobre la que se van a realizar los procesos pertinentes. Como entradas, la gris (2) corresponde al  $\text{TiO}_2$  que se añade en el decantador 1 cuando actúa como mezclador, siendo la cantidad añadida 1 gramo por cada litro de agua y por tanto 68 gramos. A continuación, tenemos la azul clara (3) que hace referencia al aire necesario en los reactores para el proceso de fotocatalisis (en este caso no tenemos cantidades, sino que entra aire continuamente durante las dos horas del proceso de fotocatalisis). La flecha de flujo negra (4) es el carbón activo (PAC) que tenemos como entrada en el proceso de adsorción y el cual añadimos la décima parte de la cantidad de catalizador, es decir 0,1 gramos por litro y por tanto 6,8 gramos. Como ultima entrada tenemos el coagulante, cloruro de hierro, (6) que se añade en el proceso de adsorción para mejorar la separación del PAC. Se añade 0,05 gramos por cada litro de agua, por tanto 3,4 gramos.

Como salidas en este caso solo tendremos la cantidad de antibióticos que se elimina en cada parte del proceso. En la fotocatalisis (5) dónde se elimina entre el 80-100% de antibióticos, tendremos una flecha de flujo verde con mayor grosor que en el proceso de adsorción (7) donde se eliminan entre el 0-20% restante de antibióticos. Y finalmente como salida principal tenemos el efluente (8) sin la mayoría de antibióticos. Las flechas de flujo rojas corresponden al consumo en kWh de cada parte del proceso. Como se puede observar, la flecha roja principal crece de manera exponencial, ya que cada vez se va sumando el consumo anterior.



**Figura 6. Diagrama de SANKEY del Ciclo 1:** Azul oscuro: Flecha de flujo de agua residual urbana tratada. Gris: Flecha de flujo de entrada del catalizador ( $\text{TiO}_2$ ). Azul claro: Flecha de flujo de entrada de aire. Negro: Flecha de flujo de entrada de PAC. Verde: Flechas de flujo de salida de antibióticos. Amarillo: Flecha de flujo de entrada de coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ). Rojo: Consumo energético.

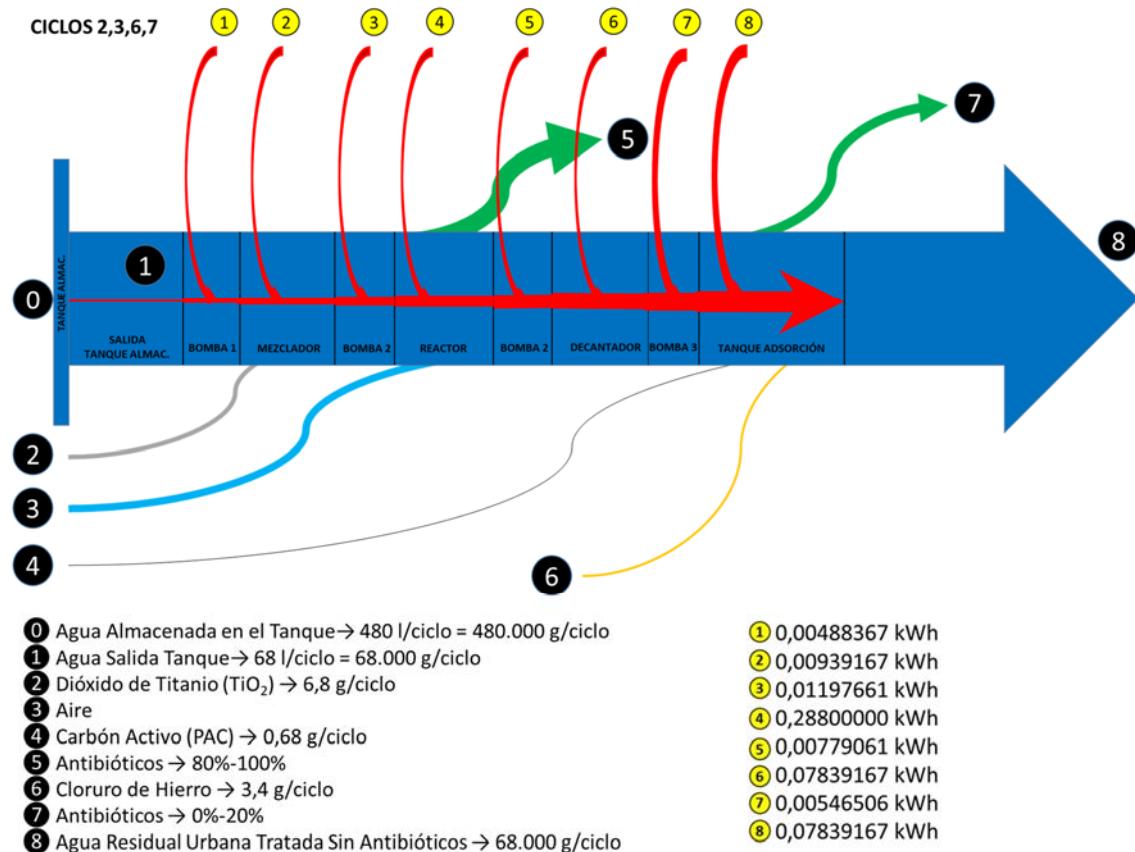
## CICLOS 2,3,6,7

En este caso se puede observar que este diagrama de SANKEY es el mismo para cuatro ciclos diferentes. Esto es así puesto que en los ciclos 2,3,6,7 solamente será necesario reponer un 10 %, tanto de catalizador ( $\text{TiO}_2$ ) como de PAC, ya que cuando el agua residual urbana tratada llegue al proceso dónde se añade el  $\text{TiO}_2$  o el PAC, tendremos un 90% reutilizado del ciclo anterior y solo será necesario añadir ese 10%. También se puede ver que el grosor de las flechas de flujo gris (2) y negra (4) es menor que para el ciclo anterior puesto que en este caso solo es el 10% ya explicado de la cantidad del ciclo 1 lo que tenemos como entrada.

Las flechas de flujo azul claro (3) y amarillo (6) son iguales que para el ciclo 1. Y tanto el agua almacenada en el tanque de almacenamiento (0), el efluente que sale de dicho tanque (1), y la salida final del efluente (8) sin la mayoría de antibióticos, son iguales que para el ciclo 1.

Con respecto al resto de salidas, las flechas de flujo verde (5) y (7) son idénticas al ciclo 1 de nuevo ya que la eliminación de antibióticos sigue siendo la misma y seguirá siendo la misma en todos los procesos.

El consumo energético (flechas de flujo rojas) se mantiene constante, siempre es el mismo en cada ciclo. En este caso los datos son iguales al ciclo 1 y por tanto corresponderá con un solo ciclo. Si quisiéramos obtener el consumo de n-ciclos, deberíamos multiplicar n-veces los kWh de cada parte del proceso.



**Figura 7. Diagrama de SANKEY del Ciclos 2,3,6,7:** Azul oscuro: Flecha de flujo de agua residual urbana tratada. Gris: Flecha de flujo de entrada del catalizador ( $\text{TiO}_2$ ). Azul claro: Flecha de flujo de entrada de aire. Negro: Flecha de flujo de entrada de PAC. Verde: Flechas de flujo de salida de antibióticos. Amarillo: Flecha de flujo de entrada de coagulante ( $\text{FeCl}_3$ ). Rojo: Consumo energético.

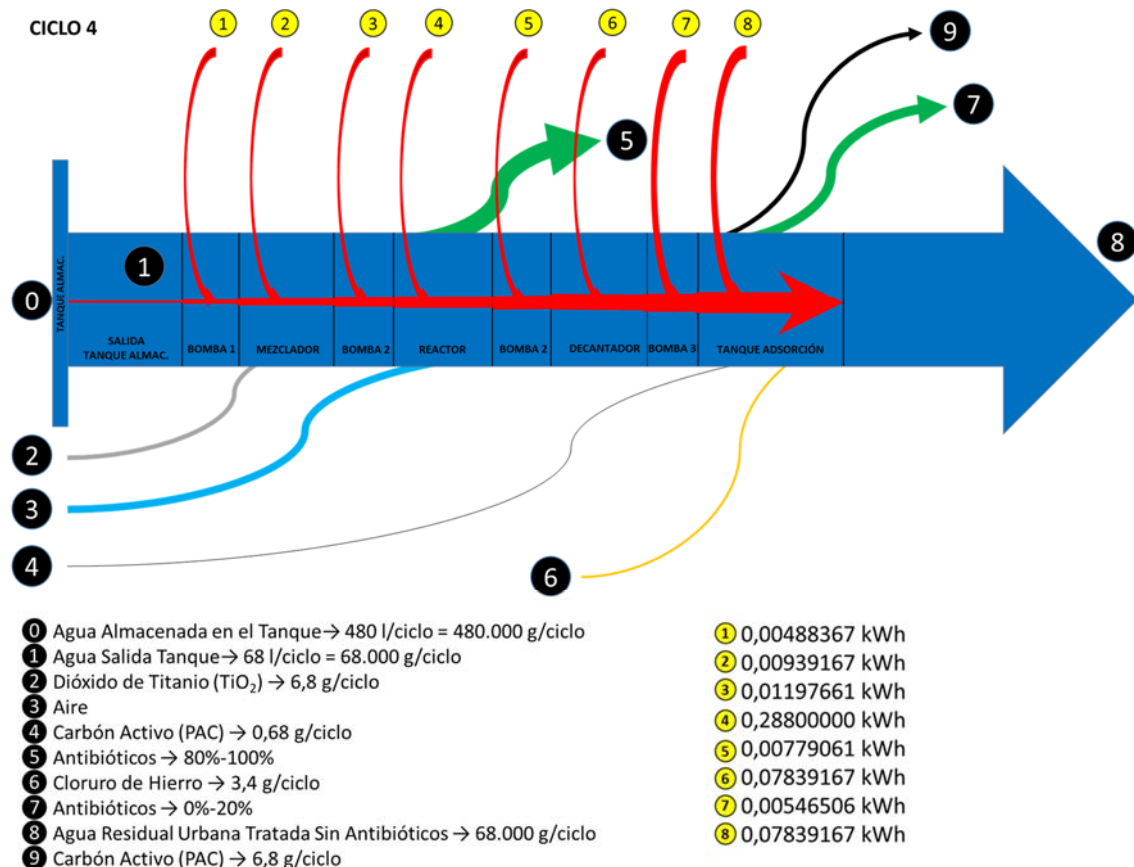
## CICLO 4

En el ciclo 4 se puede observar que todas las flechas de flujo de entrada son idénticas al diagrama de SANKEY de los ciclos 2,3,6,7. Esto se debe a que, en este ciclo de nuevo cuando el agua residual urbana tratada llega al decantador actuando como mezclador no se necesita como input toda la cantidad de catalizador del ciclo 1, ya que tenemos un 90% que reutilizamos. Ocurre exactamente lo mismo cuando el agua llega al decantador 2 o tanque de adsorción.

Como novedad en este ciclo se tiene el carbón activo (PAC) como output (flecha de flujo negra) **(9)**. Como ya se ha comentado anteriormente, el carbón activo tiene una vida útil de 4 ciclos, es decir, a los 4 ciclos se convierte en residuo y no se puede reutilizar. Tendremos por tanto de salida el 100% del carbón activo utilizado; 6,8 gramos.

Con respecto al resto de flechas de flujo de salida, son iguales a las ya explicadas anteriormente.

El consumo energético (flechas de flujo rojas) se mantiene constante, siempre es el mismo en cada ciclo. Si quisiéramos obtener el consumo de n-ciclos, deberíamos multiplicar n-veces los kWh de cada parte del proceso.



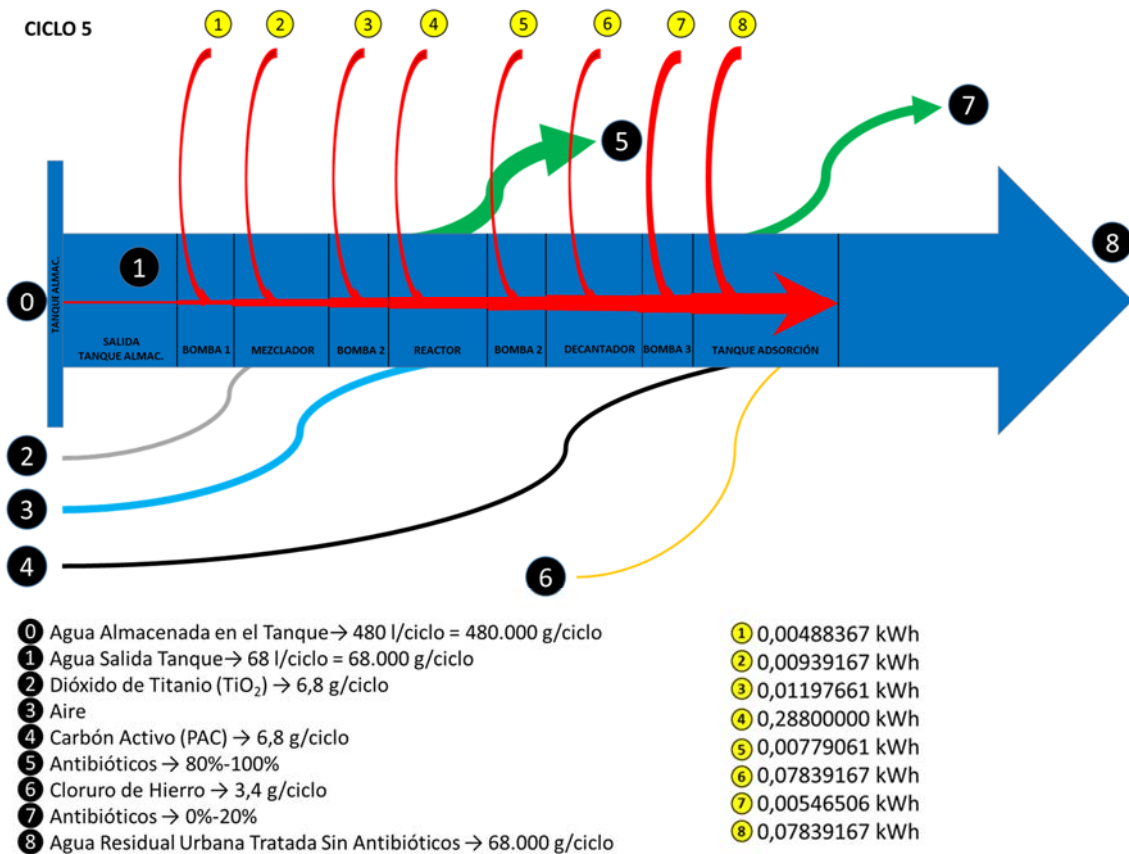
**Figura 8. Diagrama de SANKEY del Ciclo 4:** Azul oscuro: Flecha de flujo de agua residual urbana tratada. Gris: Flecha de flujo de entrada del catalizador (TiO<sub>2</sub>). Azul claro: Flecha de flujo de entrada de aire. Negro: Flecha de flujo de entrada de PAC (delgada) y de salida (gruesa). Verde: Flechas de flujo de salida de antibióticos. Amarillo: Flecha de flujo de entrada de coagulante (FeCl<sub>3</sub>). Rojo: Consumo energético.

## CICLO 5

El ciclo 5 es muy similar a los ciclos 1 y 2,3,6,7; se podría decir que es una mezcla entre ellos, puesto que en este caso tenemos como entrada principal el agua residual urbana tratada como teníamos antes junto con los 68 l que salen del tanque de almacenamiento y de dióxido de titanio tenemos de nuevo el 10% que reponemos debido a la reutilización del 90% ya comentada en ciclos anteriores. Respecto a las flechas de flujo azul claro (3) y amarillo (6) son siempre las mismas.

En este caso lo que cambia es la entrada de carbón activo (flecha de flujo negra (4)) que son 6,8 gramos, es decir la cantidad total que añadíamos en el ciclo 1, ya que como vimos en el ciclo 4 el PAC se desechaba porque su vida útil es de 4 ciclos, por tanto, en este ciclo 5 la cantidad de PAC que tenemos como input vuelve a ser la del ciclo 1.

Respecto a las flechas de flujo del consumo eléctrico (rojas) y a las de salida (5) y (7) son iguales a las ya mencionadas en ciclos anteriores.

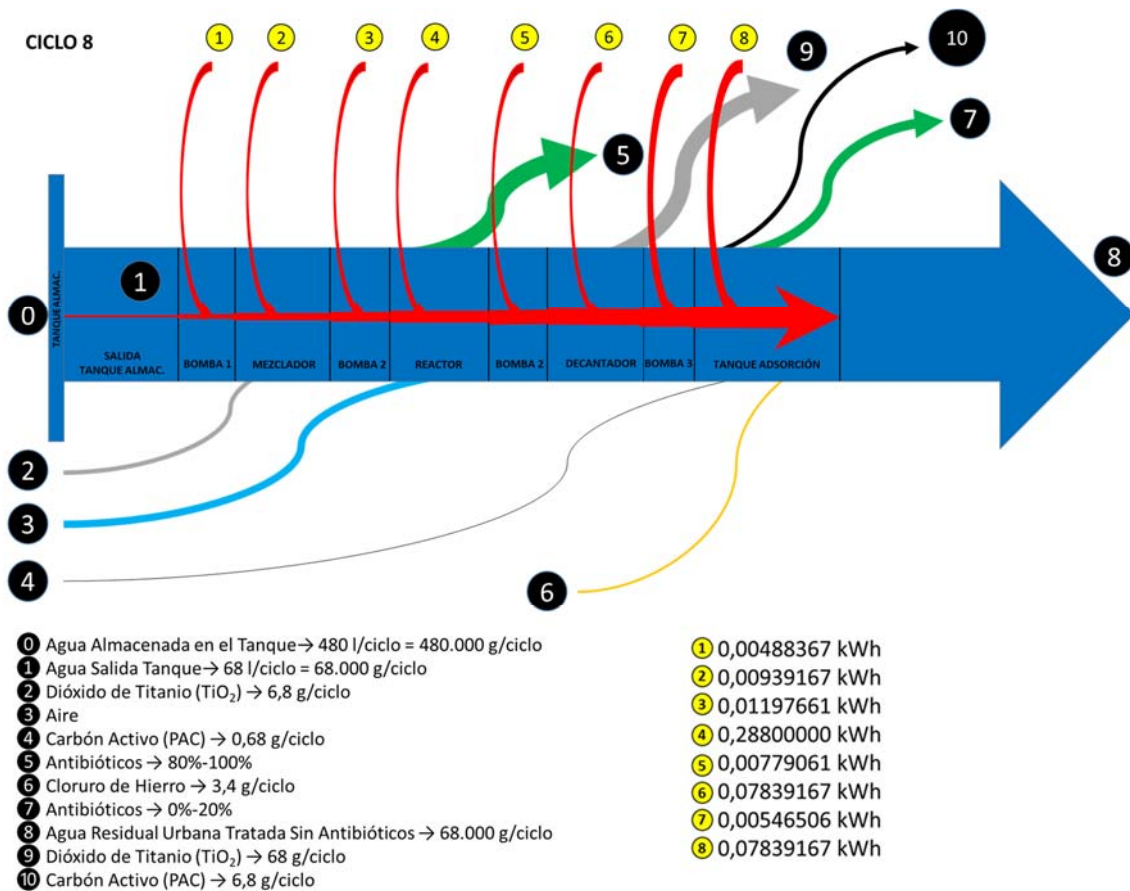


**Figura 9. Diagrama de SANKEY del Ciclo 5:** Azul oscuro: Flecha de flujo de agua residual urbana tratada. Gris: Flecha de flujo de entrada del catalizador (TiO<sub>2</sub>). Azul claro: Flecha de flujo de entrada de aire. Negro: Flecha de flujo de entrada de PAC. Verde: Flechas de flujo de salida de antibióticos. Amarillo: Flecha de flujo de entrada de coagulante (FeCl<sub>3</sub>). Rojo: Consumo energético.

## CICLO 8

Por último, se tiene el ciclo 8 que es exactamente igual que el ciclo 4, pero en este caso además de tener como salida el PAC (10), ya que de nuevo se han cumplido 4 ciclos y por tanto se ha convertido en residuo, tenemos como salida el catalizador (9), puesto que al cumplirse el octavo ciclo, la vida útil del TiO<sub>2</sub> llega a su fin y se convierte en residuo.

Por tanto, como conclusión se puede decir que se tienen en cuenta 8 ciclos exactos porque el noveno ciclo sería de nuevo volver a empezar desde el ciclo 1 ya explicado.



**Figura 10. Diagrama de SANKEY del Ciclo 8:** Azul oscuro: Flecha de flujo de agua residual urbana tratada. Gris: Flecha de flujo de entrada del catalizador (TiO<sub>2</sub>) (delgada) y de salida (gruesa). Azul claro: Flecha de flujo de entrada de aire. Negro: Flecha de flujo de entrada de PAC (delgada) y de salida (gruesa). Verde: Flechas de flujo de salida de antibióticos. Amarillo: Flecha de flujo de entrada de coagulante (FeCl<sub>3</sub>). Rojo: Consumo energético.





### 3.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)

Realizado el inventario donde tenemos todas las entradas y salidas del proceso junto con todos los datos necesarios, se procede a la evaluación del impacto del ciclo de vida, cuyo objetivo es observar qué produce mayor impacto ambiental y si sería recomendable la utilización de este proceso en cuanto a términos ambientales. Como se comentó anteriormente, el proceso consta de 8 ciclos (1 cada día) por tanto se debe hacer el EICV relativo a 8 días de 3650 días de vida útil que tiene la planta piloto. Por ejemplo, en el caso de 1 bomba cuya vida útil es de 3650 días, 8 días equivaldrán a 0,002 bombas. Esto se realiza de esta manera para obtener los impactos ambientales en 8 ciclos que es el objetivo del presente Trabajo Fin de Grado.

Para la realización del EICV, el proceso se ha dividido en cuatro etapas dentro de las cuales tenemos una serie de subetapas.

Tabla 2. Etapas y Subetapas para el EICV. En color se diferencia cada etapa junto con sus subetapas.

ETAPAS	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO				REACCIÓN		DECANTACIÓN		ADSORCIÓN	
SUBETAPAS	ALMACENAMIENTO	BOMBEO 1	AGITACIÓN	BOMBEO 2	REACCIÓN Y FOTOCATÁLISIS	BOMBEO 3	PROCESO COMPLETO	BOMBEO 4	CANTIDADES	PROCESO COMPLETO

Se han realizado diagramas de bloques para la representación en porcentaje (%) de la contribución al total de las categorías de impacto seleccionadas, cada una por separado, de cada etapa con sus subetapas correspondientes.

#### GLOBAL.

Antes de ver la relevancia de cada subetapa dentro de las etapas que se compone el proceso, hay que fijarse en las categorías de impacto del método ReCiPe y CED globales dónde, cómo se puede observar en la figura 11 aparece un diagrama de bloques con los porcentajes a los que corresponde cada etapa, siendo el de mayor importancia el que tenga un porcentaje más alto. En la figura 11 podemos observar la relevancia respecto al global de cada etapa, diferenciando unas categorías de impacto de otras. Se puede ver que para todas las categorías de impacto la etapa más relevante es la de almacenamiento y mezclado, esto es así debido a las grandes dimensiones y el material (acero inoxidable) del tanque de almacenamiento. En la figura 12 aparece más desarrollada la etapa de almacenamiento y mezclado.

Tabla 3. Categorías de Impacto globales.

	GWP (kg CO2 eq)	FETPinf (kg 1,4-DCB-Eq)	FEP (kg P-Eq)	MDP (kg Fe-Eq)	CED (MJ eq)
ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO	8,54E+01	2,05E+01	4,06E-02	3,91E+01	1,28E+03
REACCIÓN	4,22E+00	6,82E+00	5,70E-03	2,20E+01	6,80E+01
DECANTACIÓN	1,01E+01	7,09E+00	7,29E-03	6,01E+00	1,52E+02
ADSORCIÓN	8,02E+00	7,79E-01	3,19E-03	3,37E+00	1,20E+02
<b>TOTAL</b>	<b>1,08E+02</b>	<b>3,52E+01</b>	<b>5,68E-02</b>	<b>7,04E+01</b>	<b>1,62E+03</b>

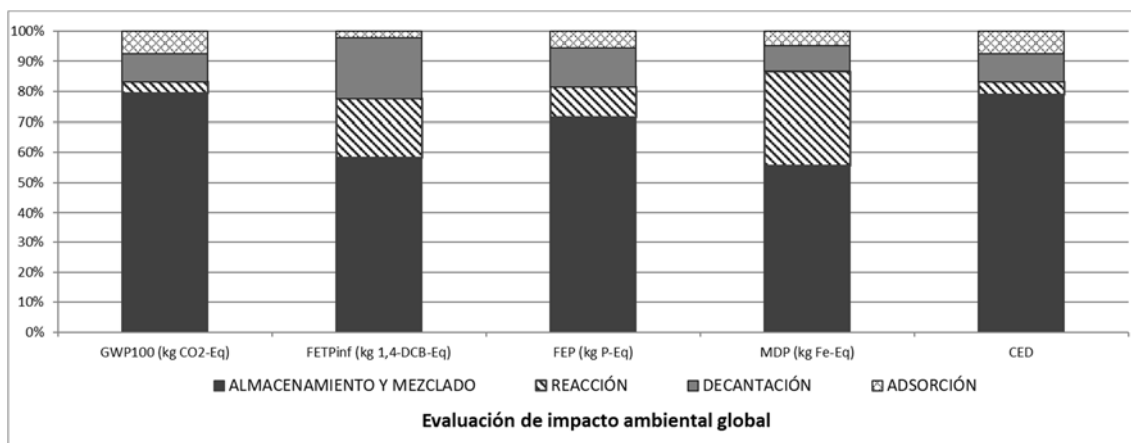


Figura 11. Diagrama de bloques global.

### 1. ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO.

En esta etapa hay que destacar en casi todas las categorías de impacto la subetapa de almacenamiento que, como se ha comentado anteriormente, al ser el tanque de almacenamiento de gran tamaño y estar fabricado con acero inoxidable, supone un impacto ambiental mayor. Como se ve en la figura 12, para todas las categorías de impacto excepto FETPinf, la subetapa que mayor impacto ambiental tiene es el almacenamiento debido a lo comentado anteriormente. A su vez la subetapa que menor impacto ambiental genera es la de agitación, debido a que el decantador 1 que actúa como mezclador no es de grandes dimensiones a pesar de estar fabricado en acero inoxidable y, además, se trata de un proceso de agitación muy rápido (5 minutos).

Tabla 4. Categorías de impacto del almacenamiento y mezclado y sus subetapas.

	GWP (kg CO2 eq)	FETPinf (kg 1,4-DCB-Eq)	FEP (kg P-Eq)	MDP (kg Fe-Eq)	CED (MJ eq)
<b>ALMACENAMIENTO</b>	<b>7,82E+01</b>	<b>7,76E+00</b>	<b>3,11E-02</b>	<b>3,37E+01</b>	<b>1,17E+03</b>
<b>BOMBEO 1</b>	<b>2,22E+00</b>	<b>6,31E+00</b>	<b>4,17E-03</b>	<b>2,64E+00</b>	<b>3,44E+01</b>
<b>AGITACIÓN</b>	<b>2,64E+00</b>	<b>9,67E-02</b>	<b>1,12E-03</b>	<b>1,20E-01</b>	<b>4,09E+01</b>
<b>BOMBEO 2</b>	<b>2,22E+00</b>	<b>6,31E+00</b>	<b>4,18E-03</b>	<b>2,64E+00</b>	<b>3,45E+01</b>
<b>TOTAL</b>	<b>8,54E+01</b>	<b>2,05E+01</b>	<b>4,06E-02</b>	<b>3,91E+01</b>	<b>1,28E+03</b>

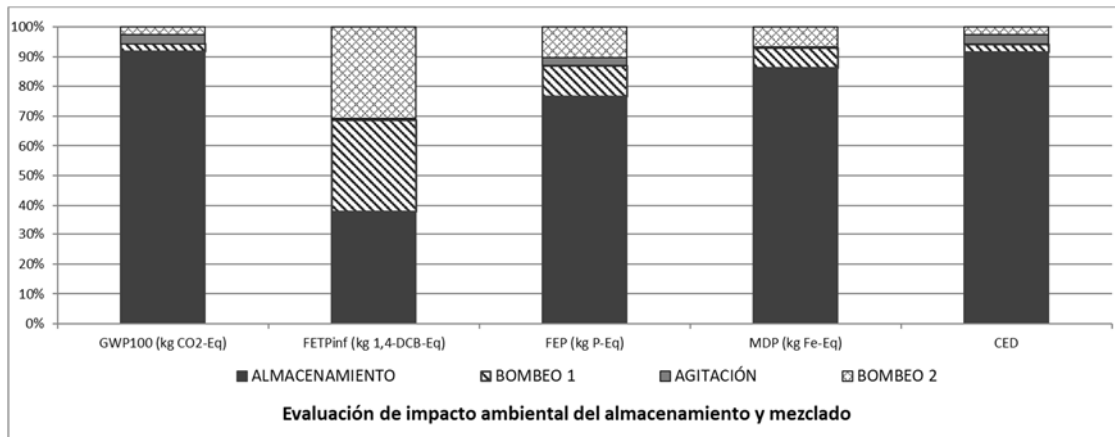


Figura 12. Diagrama de bloques del almacenamiento y mezclado.

## 2. REACCIÓN.

En la subetapa de reacción depende de la categoría de impacto en la que nos fijemos, será más relevante una subetapa u otra, por ejemplo, en la categoría de impacto MDP que hace referencia al agotamiento de metales será más relevante la subetapa de reacción y fotocatalisis porque es en presencia del catalizador que contiene como metal titanio. En cuanto a energía, se ve en la figura 13 que en la categoría de impacto CED, ambas subetapas generan el mismo impacto debido a energía. En cuanto a la subetapa de bombeo 3 se puede observar que genera mucha más ecotoxicidad en el agua que la subetapa de reacción y fotocatalisis.

Tabla 5. Categorías de impacto de la reacción y sus subetapas.

	GWP (kg CO2 eq)	FETPinf (kg 1,4-DCB-Eq)	FEP (kg P-Eq)	MDP (kg Fe-Eq)	CED (MJ eq)
<b>REACCIÓN Y FOTOCATÁLISIS</b>	2,00E+00	5,06E-01	1,53E-03	1,93E+01	3,36E+01
<b>BOMBEO 3</b>	2,22E+00	6,31E+00	4,18E-03	2,64E+00	3,45E+01
<b>TOTAL</b>	4,22E+00	6,82E+00	5,70E-03	2,20E+01	6,80E+01

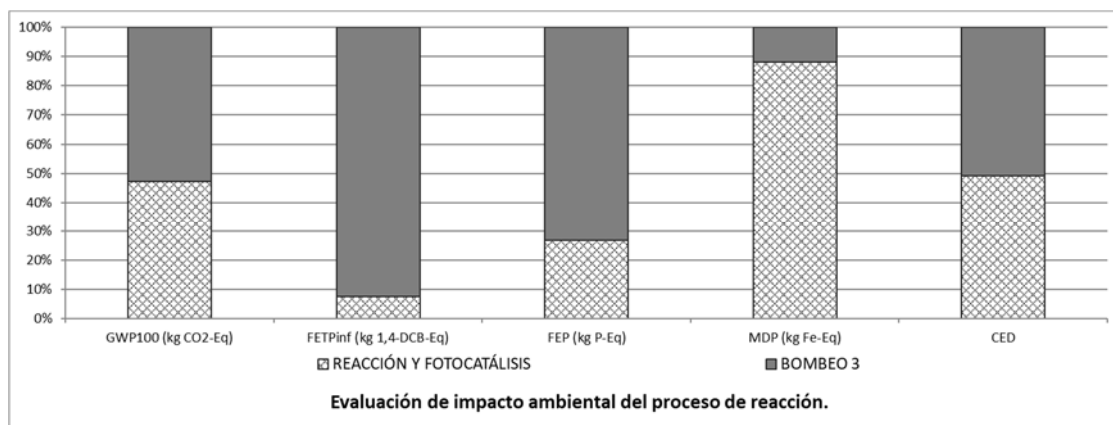


Figura 13. Diagrama de bloques de la etapa de reacción.

### 3. DECANTACIÓN.

Como se puede observar en la figura 14, en esta subetapa vuelve ocurrir lo mismo que en la anterior, que en función de la categoría de impacto en la que nos fijemos será más importante una subetapa u otra. Por ejemplo, para el método CED será de mayor relevancia el proceso completo, ya que se utilizó más energía que en el bombeo 4, porque en el proceso completo tenemos una coagulación (5 minutos) y una floculación (30 minutos) y en el bombeo 4 tan solo el propio bombeo (47 segundos) y el método CED como ya se explicó mide los MJ equivalentes. Se puede observar de nuevo como ocurría en el bombeo 3, que genera muchas más ecotoxicidad que el proceso completo. Respecto al cambio climático (GWP), genera una mayor cantidad de kg de CO2 equivalente el proceso completo que el bombeo 4.

Tabla 6. Categorías de impacto de la decantación y sus subetapas.

	GWP (kg CO2 eq)	FETPinf (kg 1,4-DCB-Eq)	FEP (kg P-Eq)	MDP (kg Fe-Eq)	CED (MJ eq)
<b>PROCESO COMPLETO DECANTADOR 1</b>	<b>7,85E+00</b>	<b>7,76E-01</b>	<b>3,12E-03</b>	<b>3,37E+00</b>	<b>1,18E+02</b>
<b>BOMBEO 4</b>	<b>2,22E+00</b>	<b>6,31E+00</b>	<b>4,17E-03</b>	<b>2,64E+00</b>	<b>3,44E+01</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1,01E+01</b>	<b>7,09E+00</b>	<b>7,29E-03</b>	<b>6,01E+00</b>	<b>1,52E+02</b>

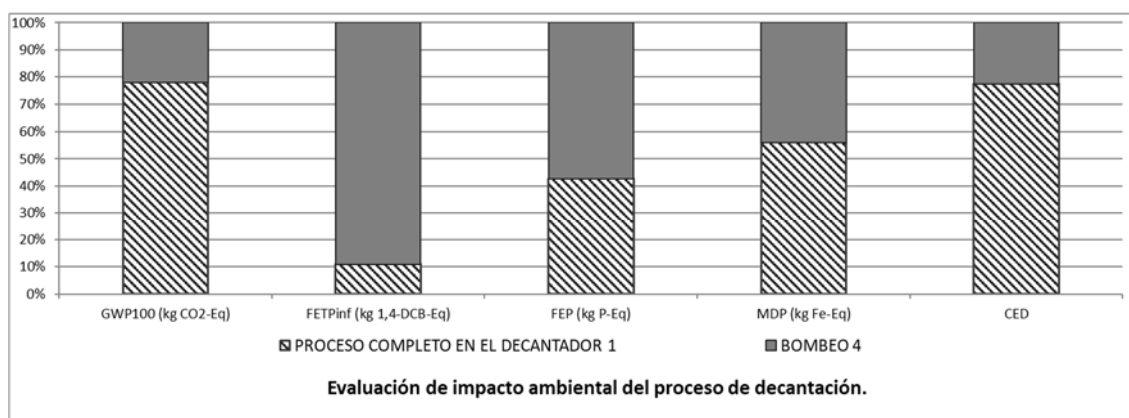


Figura 14. Diagrama de bloques de la decantación.

### 4. ADSORCIÓN.

Finalmente tenemos la etapa de adsorción en la que lo único que afecta a las categorías de impacto tanto del método ReCiPe como del CED es el proceso completo del decantador 2 puesto que la otra subetapa corresponde solamente a las cantidades utilizadas. Esto se puede observar además en la figura 15 donde se ve que prácticamente todos los impactos ambientales que se generan son debidos a la subetapa del proceso completo en el decantador 2.

Tabla 7. Categorías de impacto de la adsorción y sus subetapas.

	GWP (kg CO2 eq)	FETPinf (kg 1,4-DCB-Eq)	FEP (kg P-Eq)	MDP (kg Fe-Eq)	CED (MJ eq)
<b>CANTIDADES</b>	1,66E-01	3,10E-03	7,61E-05	3,81E-03	2,26E+00
<b>PROCESO COMPLETO DECANTADOR 2</b>	7,85E+00	7,76E-01	3,12E-03	3,37E+00	1,18E+02
<b>TOTAL</b>	8,02E+00	7,79E-01	3,19E-03	3,37E+00	1,20E+02

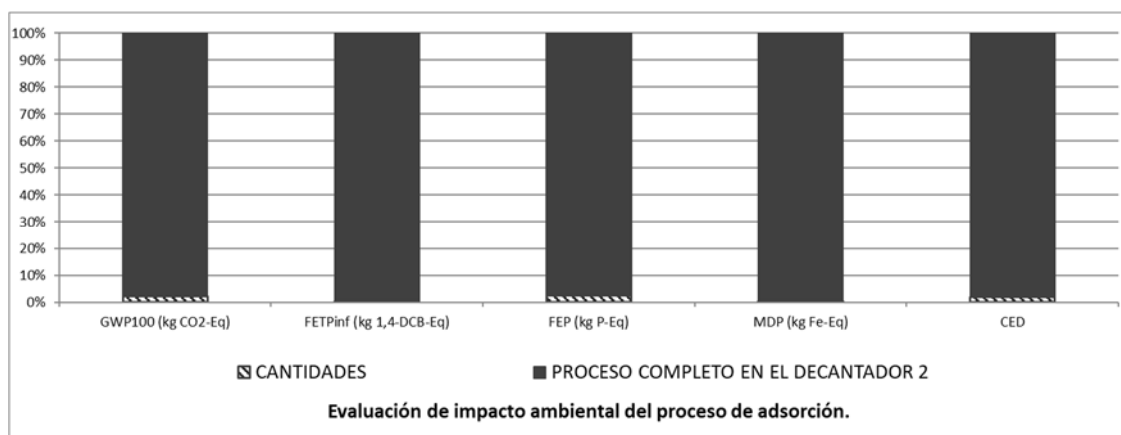


Figura 15. Diagrama de bloques de la adsorción.

En el ANEXO 3 se amplía información del ICV y EICV.

### 3.4 Posibles mejoras para el paso a escala industrial.

El paso de escala piloto a escala industrial es más complicado de lo que podría pensarse, debido a que a escala industrial los impactos ambientales que se van a generar serán más elevados, por ello puede ser de gran beneficio realizar alguna mejora de eco diseño a escala industrial. Las cantidades utilizadas de catalizador y de carbón activo en polvo, deberían ser lineales, es decir lo mismo que hacíamos para escala piloto, hacerlo para escala industrial. Por ejemplo, a escala piloto se añadía 1 gramo por litro de agua de dióxido de titanio, y a escala industrial debería seguir siendo la misma la cantidad. Por tanto, el  $TiO_2$  sería directamente proporcional a la cantidad de agua residual urbana tratada que se tuviese. Con el carbón activo (PAC) pasaría exactamente lo mismo, pero siendo la cantidad añadida 10 veces menor que la de dióxido de titanio. Respecto a la cantidad de agua máxima utilizada en el proceso, dependería de la capacidad que tengan los reactores, puesto que son más pequeños que los decantadores y que el tanque de almacenamiento. Por ejemplo, en la planta piloto, por mucha agua residual urbana tratada que se almacene en el tanque de almacenamiento, de este solo salen 68 litros por ciclo porque cada reactor tiene una capacidad de 17 litros y al haber 4 reactores ( $4 \times 17 = 68$ ) la mayor cantidad de agua residual urbana tratada que pueden almacenar los 4 reactores es de 68 litros. A escala industrial ocurrirá lo mismo, pero dependiendo de la capacidad de los 4 reactores, o en su defecto del número de reactores que haya en el proceso.

A su vez se ha podido observar mediante el EICV que la etapa que mayor impacto ambiental genera es la de almacenamiento y mezclado, en concreto la etapa de almacenamiento. Esto como ya se ha explicado, se debe al material en que está fabricado el tanque de almacenamiento, acero inoxidable. Por tanto, una mejora de eco diseño para el paso de escala piloto a escala industrial sería utilizar otro material para la fabricación del tanque de almacenamiento, como por ejemplo algún tipo de plástico u hormigón, lo que podría tener implicaciones en la reducción del impacto, aunque se debería analizar su adecuación al entorno

de uso y si resistiría el paso del tiempo. Se podría utilizar también otros materiales en los decantadores, que también son de acero inoxidable, aunque no sería tan necesario como para el tanque de almacenamiento, porque los decantadores son de menor capacidad (más pequeños). Los reactores deberían aumentar de tamaño en función de la cantidad de agua que se quiera tratar en el proceso y además se debería aumentar el tamaño de las lámparas ultravioletas y por tanto habría que estudiar su eficacia a gran tamaño. Además, se podría estudiar si sería beneficioso un cambio de material como se hacía para el tanque de almacenamiento, porque en este caso los reactores están fabricados en aluminio.

Al incrementar el tamaño de todas las partes de la instalación se podría pensar que el impacto ambiental que se genera también aumenta, pero se deberían realizar estudios porque al tratar más cantidad de agua en el proceso, el impacto ambiental relativo podría ser menor.

## CONCLUSIONES

---

La aparición de los procesos de oxidación avanzada (POA) para la minimización de los impactos ambientales generados por las industrias se ha presentado como una alternativa tecnológicamente viable y económica muy beneficiosa. Se deben conocer dichos impactos ambientales para mejorar el diseño y eficiencia de los procesos realizados en las industrias sin comprometer el medioambiente. La aplicación de la metodología del ACV, primero habla de la recopilación de datos, para posteriormente realizar el cálculo de los impactos ambientales generados. En el caso de este Trabajo Fin de Grado se ha realizado un Análisis del Ciclo de Vida de la planta piloto que hay en la EDAR de Tudela con un proceso combinado de fotocátalisis y adsorción.

- La etapa que mayor impacto ambiental genera independientemente de la categoría de impacto que valoremos, es la etapa de almacenamiento y mezclado, en concreto la subetapa de almacenamiento, dónde solo influye el peso y el material del tanque de almacenamiento. Se trata de un material que produce un elevado impacto ambiental por tratarse de un metal (acero inoxidable), además del elevado tamaño del tanque de almacenamiento.
- Los cuatro procesos de bombeo generan muy poco impacto ambiental y consumen muy poca energía debido a que son procesos muy rápidos, en concreto solo de algunos segundos, tanto de carga como de descarga.
- La etapa final de adsorción es la que menor impacto ambiental genera en cualquier categoría, esto se debe a que es un proceso muy sencillo, ya que el carbón activo al poseer una gran cantidad de micro poros facilita el proceso de adsorción gracias a la capacidad que posee como adsorbente y por tanto los antibióticos quedan adheridos a él, dejando el efluente de salida sin antibióticos.
- Debido a los impactos ambientales calculados, se han propuesto mejoras de eco diseño (apartado 3.4) como la utilización de otros materiales para la fabricación del tanque de almacenamiento debido a que al ser de gran tamaño genera un impacto ambiental muy elevado, sobretodo haciendo referencia al paso a escala industrial, dónde los impactos ambientales serán mayores que a escala piloto. Se prevé que los impactos ambientales a escala industrial sean más elevados que a escala piloto, pero al tratar más litros de agua, podría ser que el impacto ambiental relativo fuese menor.
- Aunque en la EDAR de Tudela se dispone de un número pequeño de placas fotovoltaicas, casi toda la energía proviene de la red eléctrica, debido a que se dispone de pocos días soleados al año en Navarra.
- No se han podido realizar cálculos a escala laboratorio como a escala piloto, debido a que no había disponibilidad de datos para realizarlo. El consumo a escala piloto debería ser más elevado que a escala laboratorio, pero como se puede observar es mayor a escala laboratorio. Esto se debe a las lámparas utilizadas en los reactores de fotocátalisis consumen menos energía que la lámpara de Xe utilizada a escala laboratorio.



Respecto a la eliminación de compuestos orgánicos (antibióticos), que es el objetivo que tiene el proceso combinado de fotocátalisis y adsorción, se ha podido observar que es más elevado realizando dicho proceso combinado que realizando solamente el proceso de fotocátalisis heterogénea, esto es así gracias al carbón activo en polvo que actúa como adsorbente y retiene parte de los compuestos orgánicos que no se pudieron eliminar en el proceso de fotocátalisis con  $\text{TiO}_2$ .

Como consecuencia de las limitaciones de acceso a los laboratorios de la EINA debido a la situación generada por la crisis sanitaria, finalmente se decidió no incluir el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) a escala laboratorio tal y como indicaba la propuesta de este Trabajo Fin de Grado.

# REFERENCIAS

---

- [1] UNESCO, "<https://es.unesco.org/>", 07/01/2021.
- [2] El Ágora diario del agua, "<https://www.elagoradiario.com/agorapedia/cuanta-agua-planeta/#:~:text=La%20Tierra%20tiene%20una%20disponibilidad,35%20millones%20de%20kil%C3%B3metros%20c%C3%BAbicos>", 26/11/2020.
- [3] ONU, "ODS, Objetivo 6: Agua Limpia Y Saneamiento: Por qué es importante," 2018.
- [4] Directiva 91/271/CEE, "Vertidos Urbanos y Asimilables", 21 mayo 1991.
- [5] Escuadra S. <sup>a</sup>, Gómez J. <sup>b</sup>, Altabás L. <sup>a</sup>, Lasheras A.M. <sup>b</sup>, Bezdicek J. <sup>c</sup>, Ormad M.P. <sup>a</sup> "Aplicación de nano-fotocatálisis con TiO<sub>2</sub> como tratamiento final de agua de salida de depuradora" Grupo de Investigación Calidad y Tratamiento de Aguas del Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza.
- [6] BOE número 294, "Real Decreto 1620/2007", 7 diciembre 2007.
- [7] P. Valero Lázaro, "Regeneración de aguas de salida de depuradora mediante procesos convencionales y avanzados de oxidación". Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 2017.
- [8] L. F. Garcés Giraldo, E. A. Mejía Franco, J. J. Santamaría Arango, "La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales". Revista La Sallista de la Investigación, Semillero de investigación en Gestión y Medio Ambiente SIGMA.
- [9] D. P. Torices, "Procesos de oxidación avanzada: Avances recientes y tendencias futuras.," Universidad de Cantabria, 2018.
- [10] A. Vílchez, C. Cortés, J. Feroso, C. Solans, J. Esquena, "Materiales de dióxido de titanio nano estructurados para aplicaciones en fotocatalisis", Instituto de Química Avanzada de Cataluña, Departamento I+D+I de Gerona, Centro Tecnológico CARTIF de Valladolid.
- [11] Instituto Mexicano del Petróleo, "Gaceta", cuarta época, año 3, N° 165, 25 de junio de 2018.
- [12] Tianhong Mining Co., Ltd, "<http://m.cntio2th.com/news/the-difference-between-anatase-titanium-dioxid-14896373.html>" 13/12/2020.
- [13] L. Marzo, R. Martínez-Haya, "Breve introducción a la fotocatalisis homogénea: modos de aplicación y aplicaciones sintéticas", Anales de Química, Real Sociedad Española de Química, 2018.
- [14] UNIZAR, Área TMA, "Bloque 1: Contaminación de las aguas. Tema 3: Operaciones físicas en el tratamiento de aguas" Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente.

- [15] UNIDAD 3. FENÓMENOS DE SUPERFICIE. ADSORCIÓN, "[http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion\\_19664.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf)", 03/01/2021.
- [16] C. López Velandia, "Adsorción de ácido carboxílicos de cadena corta sobre carbón activado: estudio en una reacción de esterificación". Proyecto de grado. Departamento de ingeniería química, Universidad de los Andes, Bogotá D.C. 2013.
- [17] M.T. Romero Díaz de Ávila, "Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Herramienta de Gestión Ambiental", EOI, Escuela de Negocios, 2008.
- [18] S. Moles Algarra, J. Gómez, "Parte 1: Tecnología para la eliminación de antibióticos basada en fotocatalisis con TiO<sub>2</sub>/UV validada a nivel de planta piloto". Navarra de infraestructuras locales S.A. NILSA. Interreg POCTEFA.
- [19] S. Moles Algarra, J. Gómez, "Parte 1: Tecnología para la eliminación de antibióticos con carbón activo en polvo validada a nivel de planta piloto". Navarra de infraestructuras locales S.A. NILSA. Interreg POCTEFA.
- [20] "Análisis del Ciclo de Vida y Huella de Carbono", Ed.: Ihobe. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca Gobierno Vasco, 2009.
- [21] AENOR. 2006. UNE-EN ISO 14040:2006. "Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia"
- [22] Ecoinvent Database 3.6 2019.
- [23] S. Torres Carrillo, C. Vila Pastor, H. R. Siller, "Análisis de indicadores de sostenibilidad para el proceso de fabricación de álabes para turborreactores" Escuela de ingeniería y ciencias de Monterrey, Universidad politécnica de Valencia, Universidad de Texas Norte, 2018.
- [24] F. G. García Miranda, V. Miranda Rosales, "Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico"
- [25] AENOR. 2006. UNE-EN ISO 14044:2006. "Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices"
- [26] E. Haya Leyva, Master en ingeniería y gestión medioambiental, "Análisis del Ciclo de Vida", Creative Commons Reconocimiento, 2016.

# ANEXOS

---

## **ANEXO 1. Planta Piloto.**

En este anexo se amplía información de la planta piloto sobre la que se ha realizado el Trabajo Fin de Grado, junto con imágenes de los productos utilizados durante el proceso.

### **1.1 Equipos de la Planta Piloto**

La planta piloto se encuentra en la depuradora de Tudela y ha sido diseñada por NILSA con la colaboración del Grupo de investigación Agua y Salud Ambiental de la Universidad de Zaragoza. (NOMBRAR EL WORD EN REFERENCIAS) Ha sido fabricada por la empresa Lauburu S.A., el cuadro eléctrico y automatización por Automatizaciones Zaragoza y el suministro de sensores y montaje por el personal de FCC Aqualia de la EDAR de Tudela. [1]



Figura 16. Planta Piloto.

Las siguientes ilustraciones muestran imágenes de cada parte del proceso de la planta piloto junto con su plano de alzado y planta. [1]

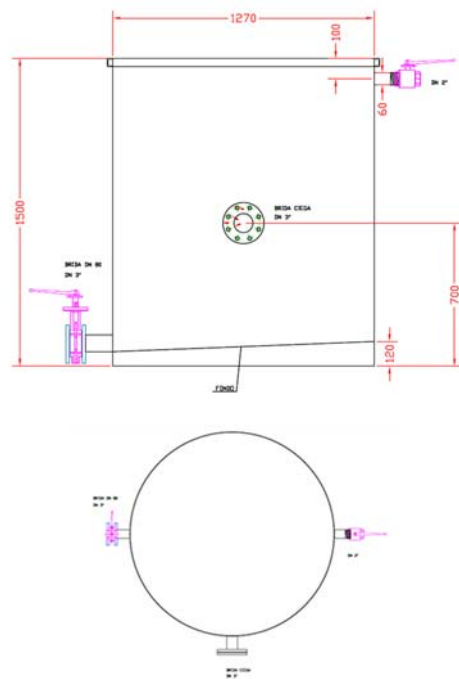


Figura 17. Tanque de Almacenamiento.

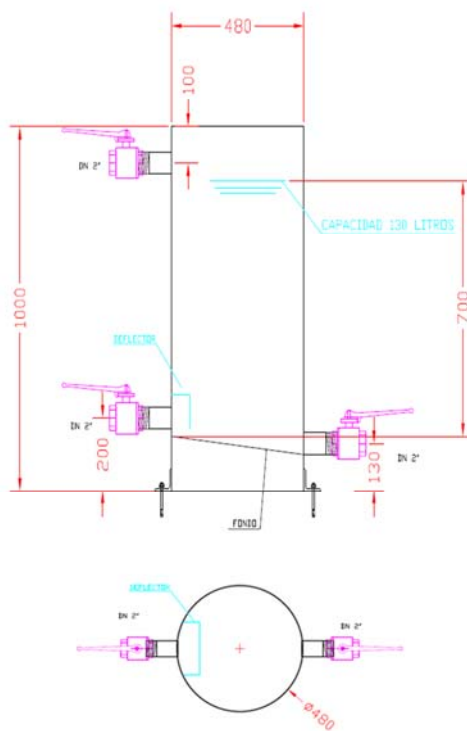


Figura 18. Decantador 1/Mezclador

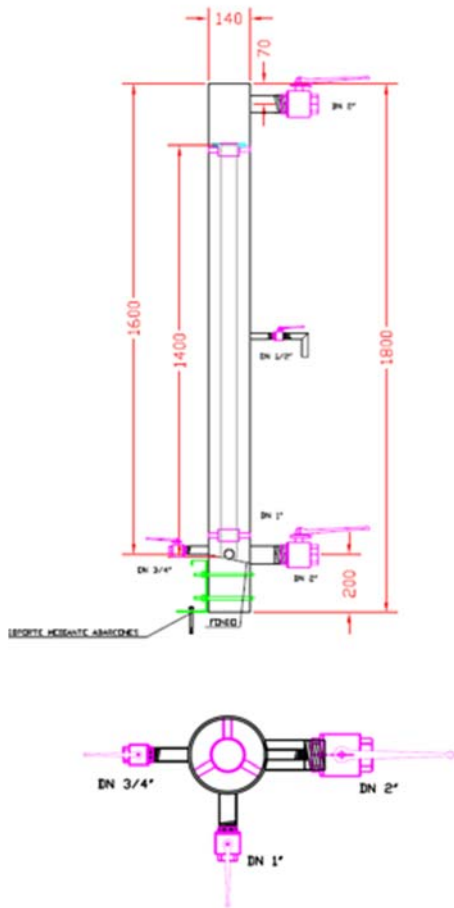


Figura 19. Reactores.

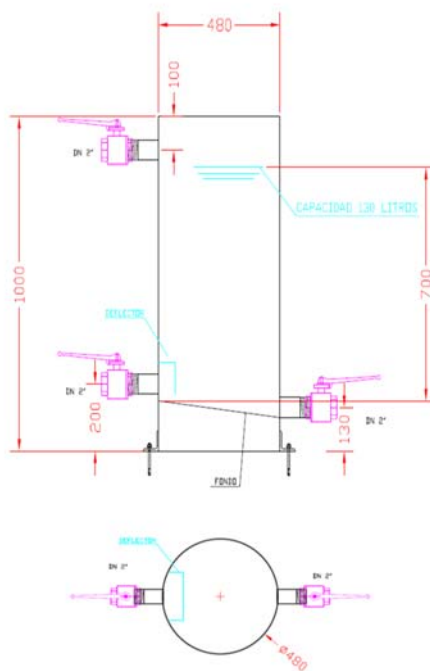


Figura 20. Decantador 2/Tanque de Adsorción.

## 1.2 Equipos de bombeo

La planta piloto cuenta con tres electrobombas de acero inoxidable iguales fabricadas por la empresa EBARA Pumps iberia.



Figura 21. Electrobombas.

## 1.3 Productos utilizados en el proceso

Durante el proceso se utilizan diferentes productos en cada parte:  $\text{TiO}_2$ , PAC,  $\text{FeCl}_3$ .



Figura 22. Agua+ $\text{TiO}_2$  y Agua+PAC respectivamente.

## ANEXO 2. Consumo Eléctrico y de Materias Primas.

En este anexo se detallan los cálculos realizados para el consumo energético que aparece en los diagramas de SANKEY de la memoria, junto con las cantidades añadidas en cada parte del proceso y en cada ciclo.

### 2.1 Consumo eléctrico.

Para la realización de estos cálculos fue necesario tomar medidas en la planta piloto de la EDAR de Tudela y así obtener la intensidad de las bombas (la de las tres bombas es la misma) que multiplicada por el voltaje correspondiente (según la ley de Watt ( $P=V*I$ )), que en este caso es 230 V puesto que se conectan a la red eléctrica nos da la potencia. Para el consumo de las dos agitadoras se realiza el mismo proceso midiendo la intensidad para las revoluciones por minutos correspondientes, y de nuevo multiplicándola por el voltaje (230 V) y obtener la potencia. La potencia de los reactores corresponde a la de las lámparas UV. Una vez calculada la potencia, se multiplica por el tiempo que está en funcionamiento cada parte del proceso (se ha realizado en horas) y así se obtiene finalmente los KWh de cada parte del proceso.

Voltaje (V)		230			
DATOS BOMBAS		TIEMPO (h)	Amperios (A)	TANQUE ALMACENAM	0 kWh
BOMBA 1		0,01166667	1,82	BOMBA 1	0,00488367 kWh
BOMBA 2 CARGA		0,02861111	1,82	MEZCLADOR	0,00939167 kWh
BOMBA 2 DESCARGA		0,01861111	1,82	BOMBA 2	0,01197661 kWh
BOMBA 3		0,01305556	1,82	REACTORES	0,288 kWh
DATOS AGITADORAS		TIEMPO (h)	Amperios (A)	BOMBA 2	0,00779061 kWh
AL 100%		0,08333333	0,49	DECANTADOR 1	0,07839167 kWh
AL 25%		0,5	0,6	BOMBA 3	0,00546506 kWh
DATOS REACTORES		TIEMPO (h)	kW	DECANTADOR 2 / TANC	0,07839167 kWh
1 LAMPARA		2	0,036		

Figura 23. Datos y Consumo.

Estos cálculos corresponden al consumo energético de un solo ciclo por tanto si quisiésemos obtener el consumo de varios ciclos bastaría con multiplicar estos datos por el número de ciclos que queramos calcular.

El consumo es exponencial, es decir, en la figura 8 aparecen calculados los KWh de cada parte del proceso, pero para obtener los KWh totales deberíamos ir sumando uno a uno y, por tanto, todos los KWh de cada parte del proceso. En este caso sería lo siguiente:

<b>TOTAL</b>	<b>0,4842909 kWh</b>
--------------	----------------------

Figura 24. Consumo total de 1 ciclo.

### 2.2 Consumos de materias primas.

Con respecto a las cantidades utilizadas en cada parte del proceso caben destacar solamente 3 además de la principal que es el agua residual urbana tratada. Estas tres son: el catalizador ( $TiO_2$ ), el carbón activo (PAC) y el coagulante ( $FeCl_3$ )

Datos:

<b>UNIDAD FUNC. (m3/ciclo)</b>	<b>0,48</b>	<b>DENSIDAD AGUA (g/l)</b>	<b>1000</b>
--------------------------------	-------------	----------------------------	-------------

Figura 25. Datos.

Se va a dividir la explicación en función de los 8 ciclos explicados en la memoria:



CICLO 1					
CANTIDAD AGUA INICIAL EN EL TANQUE	480	l/ciclo	→	480000	g/ciclo
CANTIDAD AGUA QUE SALE DEL TANQUE	68	l/ciclo	→	68000	g/ciclo
CANTIDAD TiO <sub>2</sub> AÑADIDA	1	g/l	→	68	g/ciclo
CANTIDAD PAC AÑADIDA	0,1	g/l	→	6,8	g/ciclo
CANTIDAD COAGULANTE	0,05	g/l	→	3,4	g/ciclo

Figura 26. Cantidades Ciclo 1.

Inicialmente tenemos como unidad funcional 0,48 m<sup>3</sup>/ciclo, multiplicando por 1000 para pasar a litros, obtenemos 480 l/ciclo. Pero esta es la cantidad que se almacena en el tanque de almacenamiento; la cantidad que sale del tanque de almacenamiento son 68 l/ciclo, puesto que la capacidad de los reactores es de 17 l cada uno y como hay 4 reactores en total son 68 l. Para obtener los gramos tanto de la cantidad de agua almacenada como de la que sale, basta con multiplicar el volumen por la densidad del agua (1000 g/l) y por tanto obtener 480.000 g/ciclo de agua almacenada y 68.000 g/ciclo de agua de salida del tanque. Por tanto, a partir de ahora la cantidad de agua que tenemos durante todo el proceso es 68 l o 68.000 g.

El catalizador (TiO<sub>2</sub>) que se añade debe ser 1 gramo por cada litro de agua, y como tenemos 68 litros de agua, la cantidad de TiO<sub>2</sub> que debemos añadir será 68 g/ciclo. Respecto al PAC se debe añadir una cantidad 10 veces menor a la de TiO<sub>2</sub>, serán entonces 6,8 g/ciclo.

Por último, se añade coagulante para mejorar la separación del PAC y el agua. La cantidad de coagulante (FeCl<sub>3</sub>) que se debe añadir es de 0,05 gramos por cada litro de agua, y como tenemos 68 litro de agua, la cantidad de FeCl<sub>3</sub> que debemos añadir será 3,4 g/ciclo.

CICLOS 2,3,6,7					
CANTIDAD AGUA INICIAL EN EL TANQUE	480	l/ciclo	→	480000	g/ciclo
CANTIDAD AGUA QUE SALE DEL TANQUE	68	l/ciclo	→	68000	g/ciclo
CANTIDAD TIO <sub>2</sub> AÑADIDA	1	g/l	→	6,8	g/ciclo
CANTIDAD PAC AÑADIDA	0,1	g/l	→	0,68	g/ciclo
CANTIDAD COAGULANTE	0,05	g/l	→	3,4	g/ciclo

Figura 27. Cantidades Ciclos 2,3,6,7.

Los ciclos 2,3,6,7 son exactamente iguales por eso se han realizado los cálculos una sola vez.

Respecto al agua almacenada y de salida del tanque de almacenamiento es la misma que tenemos en el ciclo 1. En este caso lo que cambia (que ya ha sido explicado en la memoria) es la cantidad de catalizador y de carbón activo que se añade. Solo se deberá añadir un 10% del total, ya que en el proceso de decantación (en ambos) el TiO<sub>2</sub> y el PAC respectivamente se quedan el fondo del decantador para su reutilización en el siguiente ciclo y solo será necesario añadir ese 10% porque existen pérdidas en el proceso y se requiere tener siempre de TiO<sub>2</sub> 1 gramo por cada litro de agua y de PAC 10 veces menos. La cantidad de coagulante añadida será siempre la misma.

CICLO 4					
CANTIDAD AGUA INICIAL EN EL TANQUE	480	l/ciclo	→	480000	g/ciclo
CANTIDAD AGUA QUE SALE DEL TANQUE	68	l/ciclo	→	68000	g/ciclo
CANTIDAD TiO <sub>2</sub> AÑADIDA	1	g/l	→	6,8	g/ciclo
CANTIDAD PAC AÑADIDA	0,1	g/l	→	0,68	g/ciclo
CANTIDAD COAGULANTE	0,05	g/l	→	3,4	g/ciclo

Figura 28. Cantidades Ciclo 4.

El ciclo 4 es idéntico en cuanto a cantidades añadidas de catalizador y de adsorbente a los ciclos 2,3,6,7, ya que lo que cambia es la salida, puesto que el adsorbente (PAC) se convierte en residuo después de este ciclo.

El agua residual urbana del tanque almacenada y de salida, así como el coagulante sigue siendo la misma.

CICLO 5					
CANTIDAD AGUA INICIAL EN EL TANQUE	480	l/ciclo	→	480000	g/ciclo
CANTIDAD AGUA QUE SALE DEL TANQUE	68	l/ciclo	→	68000	g/ciclo
CANTIDAD TiO <sub>2</sub> AÑADIDA	1	g/l	→	6,8	g/ciclo
CANTIDAD PAC AÑADIDA	0,1	g/l	→	6,8	g/ciclo
CANTIDAD COAGULANTE	0,05	g/l	→	3,4	g/ciclo

Figura 29. Cantidades Ciclo 5.

En el ciclo 5 como ya se ha mencionado en ciclos anteriores y como se verá en ciclos posteriores, la cantidad de agua residual urbana almacenada y de salida del tanque sigue siendo la misma, así como la cantidad de coagulante. La cantidad de catalizador es la misma que para los ciclos 2,3,4,6,7 porque se debe añadir el 10% que hay que reponer, y lo que cambia en este ciclo es la cantidad de PAC añadida que debe ser el total es decir 10 veces menos que la cantidad total de TiO<sub>2</sub> o 0,1 gramos por cada litro de agua, y por tanto habrá que añadir 6,8 g/ciclo. Esto es así porque en el ciclo anterior el PAC se convirtió en residuo.

CICLO 8					
CANTIDAD AGUA INICIAL EN EL TANQUE	480	l/ciclo	→	480000	g/ciclo
CANTIDAD AGUA QUE SALE DEL TANQUE	68	l/ciclo	→	68000	g/ciclo
CANTIDAD TiO <sub>2</sub> AÑADIDA	1	g/l	→	6,8	g/ciclo
CANTIDAD PAC AÑADIDA	0,1	g/l	→	0,68	g/ciclo
CANTIDAD COAGULANTE	0,05	g/l	→	3,4	g/ciclo

Figura 30. Cantidades Ciclo 8.

Para finalizar, el ciclo 8 en cuanto a cantidades añadidas es igual que los ciclos 2,3,4,6,7, lo que cambiará en este ciclo es la salida de catalizador ya que el TiO<sub>2</sub> se convierte en residuo a los 8 ciclos.

## ANEXO 3. Análisis del Ciclo de Vida.

En este anexo se amplía toda la información del ACV realizado, tanto del inventario del ciclo de vida (ICV) como de la evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV) realizado.

### 3.1 ICV.

CICLOS	Etapas	CODE inventory EXCEL	Subetapas	Proceso	Potencia (kW)	KWh en funcionamiento	RPM (%)	Tiempo (minutos)	TiO2 (kg)	Residuo TiO2 (kg)	PAC (kg)	Residuo PAC (kg)	Coagulante (kg)	Peso componentes instalación (kg/función)	Peso agua (Kg)
<b>CICLO 1</b>															
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Agitación previa de la alimentación	Despreciable	0	0		0,5						7980	480
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Primer bombeo		0,29	0,00488367		0,7							
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Mezclado del agua y catalizador		0,18	0,00939167	100	5	0,068					798	68
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Segundo bombeo		0,29	0,01197661		1,7166666							
	REACCIÓN		Aireación y fotocatalisis		0,036	0,288		120						45,9	68
	REACCIÓN		Tercer bombeo		0,29	0,00779061		1,1166666							
	DECANTACIÓN		Coagulación		0,18	0,07839167	100	5						798	68
	DECANTACIÓN		Floculación		0,18		25	30						798	68
	DECANTACIÓN		Decantación		0			85		0,0068				798	68
	DECANTACIÓN		Cuarto bombeo		0,29	0,00546506		0,7833333							
	ADSORCIÓN		Coagulación		0,18	0,07839167	100	5,00			0,0068		0,0034	798	68
	ADSORCIÓN		Floculación		0,18		25	30						798	68
	ADSORCIÓN		Decantación		0			85				0,00068		798	68
<b>CICLO 2,3,6,7</b>															
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Agitación previa de la alimentación	Despreciable	0	0		0,5						7980	480
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Primer bombeo		0,29	0,00488367		0,7							
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Mezclado del agua y catalizador		0,18	0,00939167	100	5	0,068					798	68
	ALMACENAMIENTO Y MEZCLADO		Segundo bombeo		0,29	0,01197661		1,7166666							
	REACCIÓN		Aireación y fotocatalisis		0,036	0,288		120						45,9	68
	REACCIÓN		Tercer bombeo		0,29	0,00779061		1,1166666							
	DECANTACIÓN		Coagulación		0,18	0,07839167	100	5						798	68
	DECANTACIÓN		Floculación		0,18		25	30						798	68
	DECANTACIÓN		Decantación		0			85		0,0068				798	68
	DECANTACIÓN		Cuarto bombeo		0,29	0,00546506		0,7833333							
	ADSORCIÓN		Coagulación		0,18	0,07839167	100	5,00			0,00068		0,0034	798	68
	ADSORCIÓN		Floculación		0,18		25	30						798	68
	ADSORCIÓN		Decantación		0			85				0,00068		798	68



### 3.2 EICV.

Como ya se ha explicado en la memoria, se han utilizado dos métodos diferentes, el método ReCiPe y el método CED.

El método ReCiPe consta de 18 categorías de impacto de las cuales ya hemos explicado 4. A continuación se explican el resto de categorías.

NOMBRE	SIGLAS	UNIDADES
agricultural land occupation	ALOP	m2a
climate change	GWP100	kg CO2-Eq
fossil depletion	FDP	kg oil-Eq
freshwater ecotoxicity	FETPinf	kg 1,4-DCB-Eq
freshwater eutrophication	FEP	kg P-Eq
human toxicity	HTPinf	kg 1,4-DCB-Eq
ionising radiation	IRP_HE	kg U235-Eq
marine ecotoxicity	METPinf	kg 1,4-DCB-Eq
marine eutrophication	MEP	kg N-Eq
metal depletion	MDP	kg Fe-Eq
natural land transformation	NLTP	m2
ozone depletion	ODPinf	kg CFC-11-Eq
particulate matter formation	PMFP	kg PM10-Eq
photochemical oxidant formation	POFP	kg NMVOC
terrestrial acidification	TAP100	kg SO2-Eq
terrestrial ecotoxicity	TETPinf	kg 1,4-DCB-Eq
urban land occupation	ULOP	m2a
water depletion	WDP	m3

Figura 32. Categorías de impacto.



Tabla A3. Categorías de impacto (ReCiPe) y CED de la etapa de decantación.

DECANTACIÓN	PROCESO COMPLETO EN EL DECANTADOR 1				6,13E-01	7,85E-00	2,14E+00	7,76E-01	3,12E-03	1,27E+02	5,23E-01	7,71E+02	1,88E-03	3,37E+00	-8,95E-04	3,82E-07	4,35E-02	3,17E-02	4,36E-02	3,06E-02	2,33E+00	2,33E+00	3,87E+00	8,73E-01	9,39E-02	7,48E+00	5,49E-03	4,82E-03	1,84E+01	7,65E-01	1,18E+02	
DECANTACIÓN	Coagulación	5,00	min																													
DECANTACIÓN	Floculación	30,00	min																													
DECANTACIÓN	Decantación	85,00	min																													
DECANTACIÓN	Consumo del proceso completo	7,84E-02	kWh	market for electricity, medium voltage, ES	2,82E-03	2,65E-02	7,62E-03	6,10E-04	9,89E-06	8,51E-03	1,82E-02	5,59E-04	6,74E-06	6,95E-04	-1,70E-06	3,61E-09	6,02E-05	9,71E-05	1,89E-04	1,14E-06	4,24E-03	2,30E-04	0,016757003	0,308557452	0,000102967	0,303273854	6,37324E-06	3,802E-06	5,34E-02	6,88E-02	7,51E-01	
DECANTACIÓN	Decantador 1 volumen	1,02E-01	m3																													
DECANTACIÓN	Decantador 2 peso	1,75E+00	kg	steel production, chromium steel 18/8, hot rolled, REX	6,16E-01	7,82E+00	2,14E+00	7,76E-01	3,11E-03	1,27E+02	5,05E-01	7,71E+02	1,87E-03	3,37E+00	-8,95E-04	3,78E-07	4,34E-02	3,16E-02	4,34E-02	3,06E-02	2,33E+00	2,33E+00	3,84E3	87,02575	0,0937475	7,173425	0,005483625	0,004619325	1,83E+01	6,96E-01	1,17E+02	
DECANTACIÓN	BOMBEO 4	bomba 3			2,54E-01	2,22E+00	6,18E-01	6,31E+00	4,17E-03	9,35E+00	2,59E-01	5,46E+00	1,04E-03	2,64E+00	-1,05E-04	1,99E-07	1,54E-02	1,28E-02	3,13E-02	1,64E-03	4,67E+00	1,98E-02	1,87E+00	2,51E-01	2,60E-02	4,29E+00	9,32E-03	2,36E-03	3,13E+00	1,84E-01	3,44E-01	
	Producción	2,00E-03	unidad	water pump production, 22kW, GLO	2,54E-01	2,22E+00	6,17E-01	6,31E+00	4,17E-03	9,35E+00	2,57E-01	5,46E+00	1,04E-03	2,64E+00	-1,05E-04	1,98E-07	1,54E-02	1,28E-02	3,13E-02	1,64E-03	4,67E+00	1,98E-02	1,87E+00	25,284	0,020003	4,27E4	0,0005236	0,0033548	3,15E+00	1,79E-01	3,44E-01	
DECANTACIÓN	Consumo en funcionamiento	0,00546506	kWh	market for electricity, medium voltage, ES	0,00038267	0,001708432	0,000511379	4,2533E-05	6,89527E-07	0,00092959	0,00193795	3,81133E-05	4,69995E-07	4,84199E-05	-1,8592E-07	2,51939E-10	4,19393E-06	6,7723E-06	1,17608E-05	7,97899E-08	0,00029525	1,74465E-05	0,00168211	0,021551033	7,17836E-06	0,031142678	4,44309E-07	2,65051E-07	0,003720613	0,004797811	5,23E-02	
DECANTACIÓN	TOTAL				8,73E-01	1,01E+01	2,76E+00	7,79E-01	7,29E-03	1,34E+02	7,82E-01	7,76E+02	2,92E-03	6,01E+00	-1,19E-04	5,80E-07	5,89E-02	4,45E-02	7,89E-02	3,23E-02	7,90E+00	2,35E+00	5,54E+00	1,12E+02	1,20E-01	1,18E+01	1,50E-02	7,18E-03	2,16E+01	9,49E-01	1,52E+02	

Tabla A4. Categorías de impacto (ReCiPe) y CED de la etapa de adsorción.

ADSORCIÓN	CANTIDADES				5,10E-03	1,66E-01	4,84E-02	3,10E-03	7,83E-05	6,14E-02	9,85E-03	2,83E-03	3,33E-05	3,81E-03	-9,77E-06	8,88E-09	3,68E-04	4,98E-04	5,16E-04	9,64E-06	2,91E-02	6,54E-04	3,03E-02	2,01E+00	1,60E-03	1,53E-01	5,51E-05	5,19E-05	4,89E-02	1,48E-02	2,86E+00		
ADSORCIÓN	Cantidad de PAC	4,80E-02	kg	market for activated carbon, granular, GLO	3,64E-03	1,56E-01	4,54E-02	1,83E-03	6,76E-05	5,47E-02	7,21E-03	1,52E-03	3,00E-05	9,32E-04	-8,61E-06	4,93E-09	3,17E-04	4,82E-04	8,56E-04	7,57E-06	2,49E-02	4,51E-04	0,02133616	1,888348	0,00128548	0,1099776	3,9644E-05	4,86214E-05	3,70E-02	1,09E-02	2,87E+00		
ADSORCIÓN	Cantidad de coagulante	2,40E-02	kg	iron(III) chloride production, without water, 14% iron solution base, REX	1,46E-03	1,03E-02	3,01E-03	1,48E-03	8,55E-06	1,06E-02	2,64E-03	1,31E-03	3,56E-06	2,87E-03	-1,37E-06	4,22E-09	2,89E-05	3,47E-05	6,01E-05	2,06E-06	4,80E-03	2,08E-04	0,00054488	0,1223844	0,00036156	0,043464	1,57455E-05	5,2344E-06	1,18E-02	3,98E-03	1,91E-01		
ADSORCIÓN	PROCESO COMPLETO EN EL DECANTADOR 2				6,59E-01	7,85E+00	2,14E+00	7,76E-01	3,12E-03	1,27E+02	5,23E-01	7,71E+02	1,88E-03	3,37E+00	-8,95E-04	3,82E-07	4,35E-02	3,17E-02	4,36E-02	3,06E-02	2,33E+00	2,33E+00	3,87E+00	8,73E-01	9,39E-02	7,48E+00	5,49E-03	4,82E-03	1,84E+01	7,65E-01	1,18E+02		
ADSORCIÓN	Coagulación	5,00	min																														
ADSORCIÓN	Floculación	30,00	min																														
ADSORCIÓN	Decantación	85,00	min																														
ADSORCIÓN	Consumo del proceso completo	7,84E-02	kWh	market for electricity, medium voltage, ES	2,82E-03	2,65E-02	7,62E-03	6,10E-04	9,89E-06	8,51E-03	1,82E-02	5,59E-04	6,74E-06	6,95E-04	-1,70E-06	3,61E-09	6,02E-05	9,71E-05	1,89E-04	1,14E-06	4,24E-03	2,30E-04	0,016757003	0,308557452	0,000102967	0,303273854	6,37324E-06	3,802E-06	5,34E-02	6,88E-02	7,51E-01		
ADSORCIÓN	Decantador 2 volumen	1,02E-01	m3																														
ADSORCIÓN	Decantador 2 peso	1,75E+00	kg	steel production, chromium steel 18/8, hot rolled, REX	6,16E-01	7,82E+00	2,14E+00	7,76E-01	3,11E-03	1,27E+02	5,05E-01	7,71E+02	1,87E-03	3,37E+00	-8,95E-04	3,78E-07	4,34E-02	3,16E-02	4,34E-02	3,06E-02	2,33E+00	2,33E+00	3,84E3	87,02575	0,0937475	7,173425	0,005483625	0,004619325	1,83E+01	6,96E-01	1,17E+02		
ADSORCIÓN	TOTAL				6,24E-01	8,02E+00	2,19E+00	7,79E-01	3,19E-03	1,27E+02	5,33E-01	7,71E+02	1,91E-03	3,37E+00	-8,95E-04	3,90E-07	4,38E-02	3,23E-02	4,45E-02	3,06E-02	2,36E+00	2,33E+00	3,80E+00	8,81E-01	9,59E-02	7,63E+00	5,55E-03	4,87E-03	1,84E+01	7,66E-01	1,20E+02		

Tabla A5. Categorías de impacto (ReCiPe) y CED globales.

TOTAL					9,19E+00	1,08E+02	2,95E+01	5,22E+01	5,68E-02	1,56E+03	7,67E+00	9,27E+03	2,87E-02	7,04E+01	-1,31E-02	5,80E-06	6,00E-01	4,53E-01	7,09E-01	1,76E-01	4,83E+01	2,82E+01	5,67E+01	1,30E+03	1,19E+00	1,12E+02	1,18E-01	7,15E-02	2,40E+02	1,01E+01	1,82E+03
-------	--	--	--	--	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------