

Trabajo Fin de Máster Ingeniería Ambiental

Análisis del Ciclo de Vida de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales Propuestas para las Poblaciones de Martín de la Jara y los Corrales (Provincia de Sevilla): Contactor Biológico Rotativo Versus Sistema de Filtros Verdes en Flotación.

Autor: Francisco Mora Aguilar

Tutor: Bernabé Alonso Fariñas

**Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster
Ingeniería Ambiental

Análisis del Ciclo de Vida de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales Propuestas para las Poblaciones de Martín de la Jara y los Corrales (Provincia de Sevilla): Contactor Biológico Rotativo Versus Sistema de Filtros Verdes en Flotación.

Autor: Francisco Mora Aguilar

Tutor: Bernabé Alonso Fariñas

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Máster: Análisis del Ciclo de Vida de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales
Propuestas para las Poblaciones de Martín de la Jara y los Corrales (Provincia de Sevilla): Contactor Biológico
Rotativo Versus Sistema de Filtros Verdes en Flotación.

Autor: Francisco Mora Aguilar

Tutor: Bernabé Alonso Fariñas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Este trabajo fin de máster se ha desarrollado en el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Agradezco, en general, a todas aquellas personas e instituciones que, con su colaboración, han hecho posible la realización de este trabajo y, en particular, a la supervisión del trabajo que se ha llevado a cabo por los profesores, a quienes quiero agradecer su dedicación, disponibilidad continua, sus consejos y orientaciones.

.

Sevilla, 2020

Resumen

Abstract

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvi
Notación	xviii
1 Introducción	19
2 objetivos	21
<i>Objetivo General</i>	21
<i>Objetivos Específicos</i>	21
3 Estado del Arte	22
<i>Aguas Residuales</i>	22
Características de las Aguas Residuales	22
Aguas residuales urbanas	23
<i>Fundamentos Básicos del Tratamiento de Aguas Residuales</i>	24
Recogida y conducción	24
Tratamiento	25
Tratamientos biológicos de aguas residuales	27
4 Materiales y Métodos	34
<i>Ubicación de la EDAR alternativo</i>	41
<i>Clima</i>	42
Descripción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales	27
Referencias	17
Índice de Conceptos	21
glosario	22

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Parámetros de diseño de partida para el desarrollo de ambas tecnologías. **¡Error**

r! Marcador no definido.

Tabla 4.2. Resumen de inventario para la carga de contaminantes. **¡Error**

r! Marcador no definido.

Tabla 4.3. Datos comparativos entre el Contactor Biológico Rotativo y el Sistema de Filtros Verdes en Flotación. **¡Error**

r! Marcador no definido.

Índice de Figuras

Figura 3.1. Esquema básico de aguas residuales de distintos orígenes.	23
Figura 3.2. Elementos constituyentes de las instalaciones para el tratamiento de aguas residuales.	24
Figura 3.3. Etapas de una EDAR típica.	25
Figura 3.4. Rejas en el colector.	26
Figura 3.5. Desarenador.	26
Figura 3.6. Sedimentación primaria.	27
Figura 4.1. Ubicación de las poblaciones de Martín de la Jara y los Corrales.	42
Figura 4.2 Diagrama de flujo del tratamiento de agua por contactor biológico. Modificado de Garfi et al. 2017.	28
Figura 4.3. Sistema de soporte para el crecimiento de las plantas helófitas en humedales construidos (Tecnología aQuarQ). Tomado de Quarq Enterprise, 2106. http://www.quarqenterprise.com/aquarq/tecnologia.	28
Figura 4.4. Límites del Sistema de la Fase de Operación de la planta de filtros verdes en flotación. Adaptado de Quarq Enterprise, 2106.	¡Error
! Marcador no definido.	
Figura 4.5. Límites del sistema, procesos unitarios, salidas y entradas al sistema CBR. Modificado de Garfi et al. 2017.	¡Error
! Marcador no definido.	
Figura 4.6. Esquematización de las relaciones entre intervenciones, categorías de impacto intermedias y áreas de protección. Modificado de Riffo, 2017 (Riffo J, 2017).	16
Figura 4.7. Fases, objetivos e interacciones que contemplan un análisis del Ciclo de Vida para cada EDAR. Modificado de Riffo, 2017, (Riffo J, 2017).	¡Error
! Marcador no definido.	

Notación

1 INTRODUCCIÓN

Según la definición establecida por el Real Decreto-Ley 11/1995 de 28 de Diciembre (BOE 312, de 30-12-95), que tiene por objeto la transposición al ordenamiento interno de la Directiva 91/271/CEE del Consejo relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas, se entienden las aguas residuales urbanas como aquellas aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial.

Según esta Directiva:

Las aguas residuales domésticas tienen su origen en las zonas residenciales y de servicios, se generan, principalmente, debido las actividades domésticas cotidianas, así como por el metabolismo humano. También se consideran aguas residuales industriales todas aquellas que son vertidas de locales que desarrollan una actividad comercial o industrial.

Las aguas procedentes de las escorrentías pluviales dependerán de la pluviometría de la región, así como del tipo de red de saneamiento.

Las principales características físicas que poseen las aguas residuales urbanas son el color (la coloración está asociada al tiempo de las mismas), el olor (se debe a la presencia de determinadas sustancias producidas por la descomposición anaerobia de la materia orgánica), la temperatura (adecuada para la presencia de microorganismos) y los sólidos presentes en las mismas.

Las características químicas de las aguas residuales urbanas vienen definidas por sus componentes, que pueden ser orgánicos (de origen vegetal, animal o sintético), inorgánicos (de origen generalmente mineral, como las sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas, y ciertos compuestos como sulfatos, carbonatos, etc.) y gaseosos (oxígeno disuelto, ácido sulfhídrico, anhídrido carbónico, metano entre otros).

Las características biológicas están asociadas a una gran variedad de organismos vivos que poseen la capacidad metabólica para degradar la materia orgánica e inorgánica. Los principales organismos presentes en las aguas residuales urbanas son algas, mohos, bacterias, virus, flagelados, ciliados, rotíferos, nemátodos, anélidos, larvas, etc.

El saneamiento y tratamiento de las aguas residuales municipales ha sido una preocupación a nivel global desde hace muchos años y se han hecho importantes esfuerzos para generar nuevos esquemas. Del mismo modo, se han desarrollado tecnologías dirigidas a la depuración de estos tipos de efluentes. Los sistemas de tratamiento pobremente manejados o la selección de tecnologías con bajo desempeño ambiental pueden generar riesgos a la salud y el ambiente. Debido a esto, sigue siendo un desafío a nivel mundial la implementación de sistemas apropiados. Un gran número de instalaciones en operación deben actualizarse para cumplir requisitos medioambientales más estrictos.

Las aguas residuales se someten tanto a procesos físicos como a procesos químicos y biológicos, además de a operaciones unitarias que permiten la remoción de sólidos, nutrientes y de la materia orgánica, presentes en los efluentes. Una estación depuradora de agua residual (EDAR) convencional incluye el tratamiento primario, seguido de un sistema de lodos activados o biodiscos, según la tecnología utilizada. La operación de las EDARs está asociada a un alto consumo energético debido al sistema de bombeo, principalmente, y a los tratamientos biológicos. Este aspecto es importante, ya que el sector de la energía representa el 35% de las emisiones mundiales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Massoud, 2009).

Durante las últimas décadas, las tecnologías naturales (también conocidas como tecnologías basadas en la naturaleza) para el tratamiento de aguas residuales han venido ganando interés, ya que son una alternativa atractiva a los sistemas de tratamiento convencionales en comunidades pequeñas (Rozkosný, et al, 2014); (Yildirim y Topkaya, 2012). Las tecnologías de tratamiento natural utilizan procesos de autotratamiento que pueden tener lugar en el suelo, en el agua o en el medio ambiente de humedales construidos (Rozkosný, et al, 2014). Por tanto, se caracterizan por tener un bajo consumo energético, de simple operación y menores costos de capital y operativos, en comparación con los sistemas convencionales (European_Union, 2000); (Rozkosný, et al, 2014).

Entre las tecnologías naturales para tratar aguas residuales están los humedales artificiales o construidos. Estas tecnologías cuentan con sistemas de filtración elaborados con materiales filtrantes definidos o están constituidos por tamices de filtración rizomática, creados por variedades de plantas helófitas específicas. En estos sistemas, las aguas residuales fluyen a través del filtro material y el tratamiento se lleva a cabo mediante procedimientos químicos, físicos y procesos biológicos (Rozkosný, et al, 2014). La presencia de vegetación es crucial en la eficiencia del tratamiento, produciendo un efluente adecuado para diversas aplicaciones de reutilización (por ejemplo, riego de cultivos no alimenticios) (Pedescoll, et al., 2013). En la actualidad, existen varios miles de humedales artificiales en funcionamiento en todo el mundo, ya que son una tecnología adecuada para tratar aguas residuales municipales e industriales en muchas regiones con diferentes tipos de clima [(Garfi, M, et al., 2012); (Vymazal, Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment, 2005); (Vymazal, 2014)].

A pesar de las bondades ambientales que se han formulado, en general, con la implementación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales, en comparación con las tecnologías convencionales, es necesario evaluar su desempeño ambiental cuando se tratan de nuevas modalidades y esquemas de filtración de forma extensiva y para las condiciones particulares del sitio. En este sentido, el análisis del ciclo de vida (ACV) aplicado a plantas de depuración de aguas residuales (EDAR) ha representado una herramienta muy versátil para cuantificar los impactos ambientales asociados con la infraestructura de agua urbana, incluidas plantas de tratamiento de aguas residuales (Corominas et al., 2020). A medida que el campo de aguas residuales pasa de un paradigma de eliminación de contaminantes a uno que incluye la recuperación de recursos (Guest et al., 2009) y la búsqueda de economías circulares, los ACV pueden jugar un papel importante al evaluar la sostenibilidad ambiental de las nuevas tecnologías y procesos, capturando compensaciones entre varias categorías de preocupación ambiental. En particular, como método de evaluación ambiental cuantitativa, el ACV sirve como una herramienta útil de apoyo a la toma de decisiones la selección de futuras tecnologías durante la planificación estratégica (Lundie et al., 2004).

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar los potenciales impactos ambientales, mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), de dos diseños de estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR): Contactador Biológico Rotativo (CBR) versus sistema de filtros verdes en flotación. Alternativas propuestas para el manejo de las aguas residuales de las poblaciones Martín de la Jara y los Corrales, Provincia de Sevilla.

2.2. Objetivos Específicos

1. Definir el objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida en particular y modelar los escenarios de cada EDAR a evaluar, considerando los límites del sistema.
2. Realizar el análisis de inventario de acuerdo a la ingeniería de cada EDAR y los factores de emisión de los procesos involucrados, para realizar el Análisis de Ciclo de Vida.
3. Evaluar el impacto ambiental, cuantificando las emisiones de Gases de Efecto Invernadero del sistema y calculando el indicador Potencial de Calentamiento Global, para las dos tecnologías de EDAR propuestas
4. Identificar las actividades que posean un mayor impacto ambiental, con respecto al Potencial de Calentamiento Global.
5. Recomendar la tecnología con mejor el desempeño ambiental.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1. Aguas Residuales

Desde que las sociedades pasaron de ser culturas nómadas a construir sitios más permanentes, la disposición de los residuos se ha convertido en una de las principales preocupaciones del ser humano que ha tratado de resolverla de muy diversas maneras.

El agua residual que produce una comunidad procede, esencialmente, del agua suministrada después de haber sido contaminada por sus diversos usos. Estas aguas residuales se originan a partir de las aguas mezcladas con las procedentes del metabolismo humano y denominadas aguas negras, las aguas grises que proceden del lavado doméstico.

El tratamiento que se le da a las aguas residuales consiste en un proceso que permite eliminar la carga contaminante que estas poseen, ya sea mediante procesos biológicos que imitan a la naturaleza o por medio de procesos físicos o químicos que aceleran la eliminación.

En la depuración de las aguas residuales se propone, como objetivo principal, proteger al medio ambiente, para lo cual es necesario eliminar de estas aguas residuales ciertos elementos específicos. Además de determinar qué productos deben ser eliminados y en qué proporción, plantear la realización del análisis de las condiciones del lugar y de las normas reguladoras de calidad de las aguas.

El proceso de depuración de las aguas residuales mediante la tecnología de Lodos Activos ha incrementado su uso en los últimos años. Al someter a las aguas residuales a un proceso de aireación se producen flóculos en estas, lo que permite que se puedan separar por decantación, además, la presencia de los flóculos logra reducir el tiempo necesario para eliminar los contaminantes biodegradables y la nitrificación de los compuestos nitrogenados (Salas, 2004).

El tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de los Lodos Activos constituye la tecnología más usada a nivel mundial (más del 70%) (Salas, 2004).

En este proyecto se realiza el análisis del ciclo de vida de los sistemas de depuración de aguas residuales: macrófitas en flotación y contactores biológicos rotativos, con el propósito de estudiar los impactos medio ambientales asociados a cada proceso.

Se realiza al análisis del ciclo de vida (ACV) de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) que utilizan los procesos:

- Macrófitas en flotación.
- Contactores biológicos rotativos.

Con el propósito de determinar el impacto en el medio ambiente asociado a cada tipo de planta depuradora, así como identificar las mejoras necesarias para minimizar los efectos negativos al medio ambiente, el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite estudiar tanto los aspectos medioambientales como los impactos potenciales que tienen los productos o procesos a lo largo de su vida útil, ya sea en la producción de productos o en sistemas de producción. El ACV permite determinar e identificar las posibles alternativas en instalaciones con mayor impacto en el medio ambiente. En esta tesis se desarrolla el ACV mediante el uso del software Simapro, la cual es una herramienta que permite la evaluación de impactos.

3.1.1. Características de las Aguas Residuales

Las aguas residuales, debido a su composición, se pueden clasificar según su origen: urbano o industrial. Cuando se trata de aguas residuales de origen industrial, en muchos casos, se requiere de un tratamiento previo, en función de su composición, antes de ser vertidas al alcantarillado. Muchos de los procesos para el tratamiento

de aguas residuales de origen urbano son utilizados también con las de origen industrial.

3.1.2. Aguas Residuales Urbanas

Se definen las aguas residuales urbanas como los vertidos que se producen como consecuencia de las actividades de la población urbana. Las aguas residuales urbanas generan los siguientes aportes:

- Aguas negras o aguas sanitarias: Constituyen una combinación de las aguas que proceden del metabolismo humano (retretes de las viviendas, de los centros comerciales, etc).
- Aguas grises (de lavado doméstico), que según el Diccionario Técnico del Agua son “las procedentes de los usos domésticos antes de mezclarse con las aguas fecales. Proceden del lavado de ropa, limpieza de la casa, desperdicios de comida, etc.” Contienen materia en suspensión formada por tierra, arena y diversas materias insolubles, materia orgánica, grasas, detergentes y sales diversas.
- Aguas de drenaje de calles. Generalmente representan un pequeño volumen, las condiciones locales determinan su nivel de contaminación.
- Agua de lluvia y lixiviados. Es el agua que cae de las nubes en forma líquida o sólida. Es un agua que nunca es pura. Contiene disueltos distintos gases, además de determinados iones que se encuentran en la atmósfera en forma de polvo y que son el resultado o la consecuencia de diversos fenómenos que en ella se producen. Esto es particularmente notable en las zonas industriales y en las grandes aglomeraciones urbanas, donde la atmósfera que los rodea está extraordinariamente polucionada.

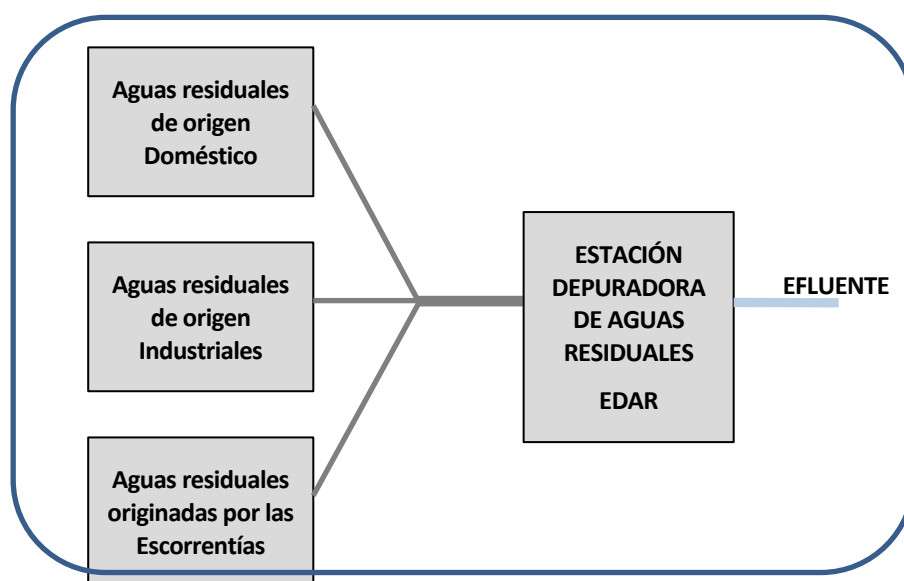


Figura 3-1. Esquema Básico de Aguas Residuales de Distintos Orígenes.

Las aguas residuales urbanas se consideran homogéneas, ya que la composición y carga contaminante no varía mucho entre las diferentes poblaciones desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo. Los parámetros que influyen en las características de cada vertido son:

- Número de habitantes.
- La existencia de industrias dentro del núcleo.
- Tipo de industria, entre otros.

Las aguas residuales industriales son aquellas que provienen de la actividad o del negocio que involucra el uso agua durante su proceso de producción. Son muy variables con respecto a su composición y caudal, lo que hace que las características de los vertidos puedan variar de una industria a otra.

Las aguas residuales de origen industrial están más contaminadas que las aguas residuales urbanas, por lo que

se hace difícil disminuir el nivel contaminante de las mismas. Debido a la variabilidad que presentan y a su alta carga, se hace muy complicado el proceso de tratamiento de estas aguas residuales. Dada esta variabilidad, resulta muy compleja la tarea de establecer una clasificación de las aguas residuales de origen industrial, generando que cada industria tenga un agua residual característica.

3.2. Fundamentos Básicos del Tratamiento de Aguas Residuales

Los elementos que constituyen las instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales urbanas son:

- Recogida y conducción de las aguas generadas hasta la estación de tratamiento.
- Tratamiento de las aguas residuales.
- Evacuación de los productos resultantes del tratamiento, efluentes depurados y lodos.

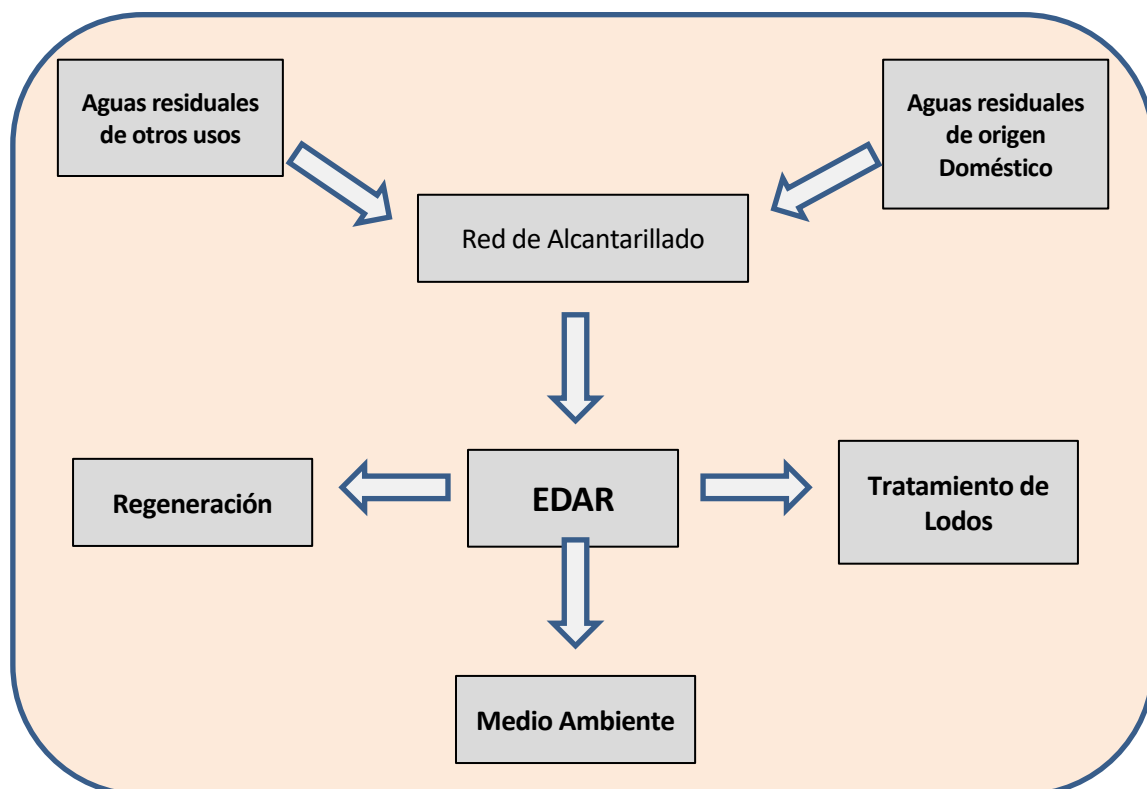


Figura 3-2. Elementos constituyentes de las instalaciones para el tratamiento de aguas residuales.

3.2.1. Recogida y Conducción

La recogida y conducción de las aguas residuales urbanas desde el lugar donde se generan (población) hasta la estación depuradora (EDAR) se realiza a través de una red de tuberías que usualmente son conducidas por la gravedad o mediante las estaciones de bombeo. Estos sistemas se clasifican en:

- Unitarios, son aquellos donde se recogen tanto las aguas residuales como las pluviales.
- Separativos, son aquellos donde las aguas pluviales se recogen en colectores independientes, mientras que las aguas residuales son transportadas en colectores hasta la estación de tratamiento.

Para evitar el exceso de caudal a la entrada de la EDAR y prevenir la contaminación de los medios receptores

se implementan las siguientes actuaciones:

- Implantación de aliviaderos con una relación de dilución más elevada.
- Para separar y retirar los elementos gruesos, se instalan los equipos de desbaste en el vertido de los aliviaderos.
- Para regular la entrada del caudal se construyen balsas o depósitos de tormentas.

3.2.2. Tratamiento

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales usados en las pequeñas poblaciones son muy variados:

- Aireación prolongada.
- Biodiscos rotativos.
- Humedales artificiales.
- Lagunaje, etc.

Todos estos sistemas se caracterizan porque proporcionan un efluente con buenas propiedades, tienen un funcionamiento robusto, son de fácil mantenimiento y de control simple. Todos ellos requieren de un tratamiento primario que retire los sólidos en suspensión que pueden perjudicar la formación de la biopelícula, además, permite estabilizar por vía anaerobia los lodos producidos en la línea de agua.

Las etapas comunes que componen el tratamiento previo a los sistemas de depuración (biodiscos rotativos y Macrófitas en flotación) de las aguas residuales urbanas en una EDAR, son:

- Pretratamiento.
- Tratamiento Primario.

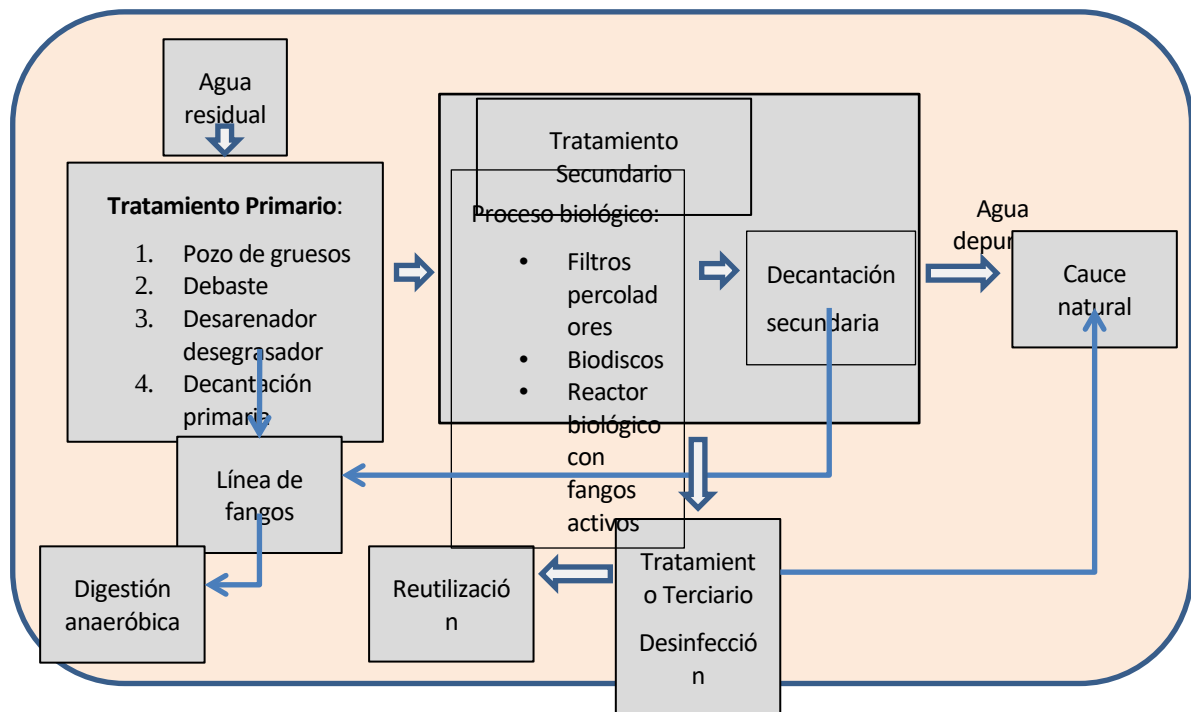


Figura 3-3. Etapas de una EDAR típica.

3.2.2.1. Pretratamiento

La primera operación en la EDAR tiene como objetivo eliminar la mayor proporción de los residuos sólidos que poseen mayor volumen, además de los sólidos inorgánicos que llegan al colector, para lo cual se disponen de una sucesión de barras (rejas) con diferentes pasos de luz, como se muestra en la figura 3.4.

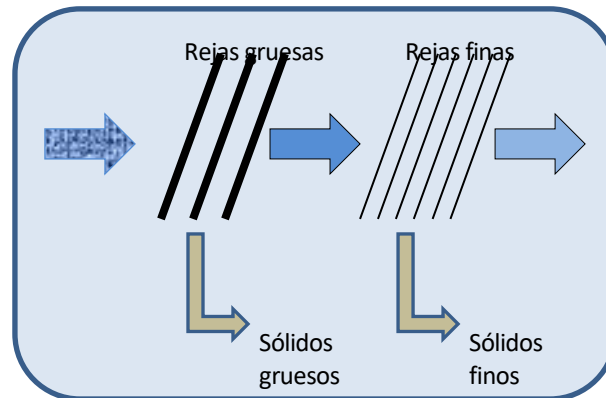


Figura 3-4. Rejas en el colector.

Los residuos que extraen son depositados en contenedores, previamente a ser enviados al vertedero. Los sólidos de mayor volumen quedan retenidos en las rejas con paso de luz de 5 cm, donde un mecanismo los transporta hasta un contenedor para ser llevados a un vertedero. A este proceso también se le denomina Desbaste. Según la separación de las rejas, se clasifican en:

- Desbaste de gruesos (rejas gruesas): el espacio libre entre barras está entre de 5 a 10 cm.
- Desbaste de finos (rejas finas): el espacio libre entre barras está entre de 1 a 2,5 cm.

En esta etapa se realiza un tamizado cuyo paso está comprendido entre 0,2 y 6 mm. Este proceso permite reducir los sólidos que se encuentran en suspensión.

El siguiente paso consiste en la reducción de arenas y grasas, con el propósito de disminuir la probabilidad -de que produzcan daños en los elementos mecánicos, además de ciertas alteraciones en la sedimentación y, además, evitar la acumulación de estas materias pesadas. Los desarenadores se diseñan para eliminar las partículas cuyo tamaño es mayor a 0,2 mm.



Figura 3-5. Desarenador.

En la etapa de desengrasado se eliminan las grasas y materias flotantes cuya densidad es menor que el agua. El desarenado y desengrasado se desarrolla en unidades de tratamiento de manera conjunta.

3.2.2.2. Tratamiento primario

En el tratamiento primario se eliminan aquellos que se encuentran en suspensión de las aguas residuales, esta etapa es previa al tratamiento biológico. La sedimentación de partículas agregadas se lleva a cabo en un tanque adecuado, en el fondo del tanque se sedimentan entre el 40 y el 65% de los sólidos finos, que luego se extraen por medio de procesos mecánicos en forma de lodos.

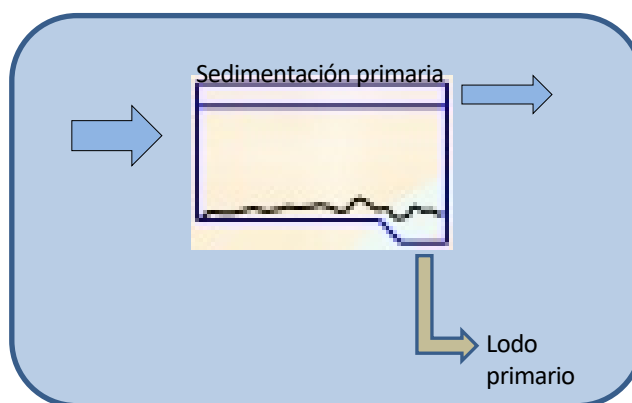


Figura 3-6. Sedimentación primaria.

3.2.2.3. Tratamientos biológicos de aguas residuales

Los sistemas de depuración con macrófitas en flotación son denominados como tecnologías no convencionales, sistemas naturales o sistemas verdes, entre otros. El consumo energético de estos sistemas es bajo. Su uso se ha extendido entre las pequeñas comunidades rurales. Entre las desventajas que presenta este sistema está la provisión de los servicios y saneamiento debido a su localización geográfica y/o por su grado de desarrollo.

Un tipo muy interesante entre los sistemas blandos es el de los “fitosistemas”, donde se utiliza la energía solar a través del proceso fotosintético de los vegetales, tanto de algas como de vegetales superiores (macrófitas), en sustitución de la energía convencional que se emplea normalmente en las EDAR. Los consumos energéticos de estos sistemas son muy bajos y permiten que los costes de mantenimiento sean muy bajos, pero requieren una mayor superficie de terreno por habitante.

Las macrófitas en estos sistemas se encuentran flotantes, lo cual se logra a través de diversos mecanismos. Los filtros de macrófitas en flotación (FMF) es el mecanismo más destacado actualmente.

3.3. Descripción de Los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales a Evaluar

3.3.1. Contactor Biológico Rotativo (CBR) – BIODISCOS

El CBR es un sistema convencional de tratamiento secundario de aguas residuales que consta de una serie de discos paralelos espaciados, montados en un eje giratorio que es apoyado sobre la superficie de las aguas residuales (Figura 4-2). La degradación de la materia orgánica es realizada por los microorganismos adheridos a los biodiscos, estos están en contacto con la biomasa, y de manera alterna con el agua residual que será tratada y con el oxígeno atmosférico. Para prevenir el deterioro por efectos meteorológicos, la

operación de los CBRs se realiza bajo cubierta. Las EDR que operan con sistemas de CBR presentan unidades de tratamientos previos tales como: Desbaste, Desarenado y Desengrasado) y un tratamiento Primario por decantación (Garfi, M, et al., 2012), (Garfí M, et al., 2017). Luego que el efluente salga de la unidad de biodiscos, pasa por unidades de sedimentación secundaria y de desinfección para luego ser vertido al ambiente. Los lodos generados en las unidades de pretratamiento y en el sedimentador secundario son espesados y deshidratados antes de su disposición al ambiente o reutilización.

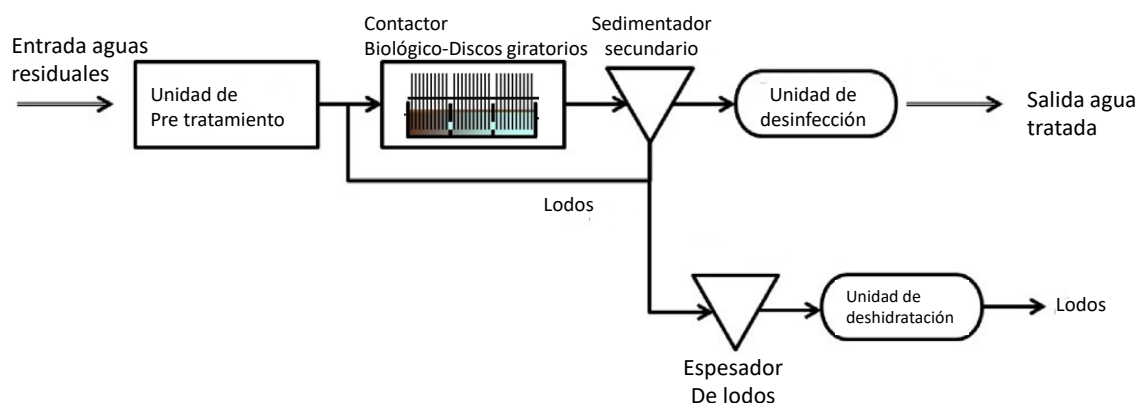


Figura 3-7. Diagrama de flujo del tratamiento de agua por contactor biológico. Modificado de Garfi et al. 2017.

3.3.2. Sistema de Filtros Verdes en Flotación (SFVF)

El SFVF es una modalidad de sistema de tratamiento extensivo de aguas residuales basado en el concepto de humedales construidos y ampliamente conocidos e implementados a nivel global [(EPA, 1988), (Headley et al., 2008), (Hidrolution FMF, 2015), (Martelo y Lara, 2012)]. Existe una variedad de modalidades y desarrollos de ingenierías basados en los sistemas SFVF; no obstante, para este estudio, el EDAR propuesto como sistema de depuración contempla la conformación de humedales construidos con el desarrollo de tamices vegetales de helófitas en flotación, conocido comercialmente como Sistema AQUARQ (Quarq Enterprise, 2016). En este sistema en particular, las plantas macrófitas se hacen crecer sobre un soporte o una estructura que flota sobre la lámina de agua del humedal o balsa y es anclada a los taludes de los mismos (Figura 4.3). Con esta tecnología, las plantas pueden desarrollar un denso entramado rizomático que puede alcanzar una profundidad de hasta 0,7 m de espesor bajo la superficie del agua. De esta manera, captan el oxígeno de la atmósfera y lo conducen hasta el sistema radicular a través de sus múltiples canales aeríferos internos. Luego el oxígeno es inyectado al agua a través del entramado rizomático promoviendo, de esta manera, un sistema bien aireado. Este proceso permite el desarrollo de bacterias aerobias que degradan la materia orgánica y el desarrollo de bacteriófagos en la rizosfera, que fagocitan a los agentes patógenos del agua a tratar.



Figura 7-8. Sistema de soporte para el crecimiento de las plantas helófitas en humedales construidos

3.4. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

3.4.1. Generalidades de los Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) considera todas las etapas de un proyecto o actividad desde que nace, se realiza la concepción de la idea, el diseño, la implementación o la construcción, la operación, el mantenimiento, la ampliación e incluso su cierre o clausura y disposición de los restos que eso genera. Es decir, la muerte del proyecto; por ello se asocia con la concepción “de la cuna a la tumba”. El centro de la metodología es identificar y valorar los impactos ambientales y hasta socio-culturales que se generan en cada una de esas etapas o fases del proyecto, desde su concepción hasta su clausura, para mitigarlos, corregirlos o compensarlos, en fin, reducirlos, haciendo que el proyecto sea ambientalmente amigable durante toda su vida.

También puede emplearse la metodología del ACV para comparar propuestas, ideas u opciones, determinando cuál es la menos impactante de manera negativa y cuál es más favorable, eligiendo la mejor. Justamente, esto es lo que se realizó en el presente trabajo, se determinó la metodología del ACV para decidir quién genera más impactos ambientales y socio-culturales positivos y cuál genera más impactos negativos, si una EDAR de biodiscos o una EDAR de laguna facultativa con plantas acuáticas y, así, seleccionar cuál es la EDAR más conveniente en dos comunidades: Los Corrales y Martín de la Jara.

La función principal de un ACV, según Geo Innova (s.f.), es proporcionar información que facilite la mejora del desempeño ambiental. El ACV permite comparar entre procesos o productos diferentes, por lo que se obtiene información aplicable directamente en el diseño y desarrollo de los productos, en la mejora continua de los procesos, en la planificación estratégica, entre otros aspectos.

De acuerdo con ECO Inteligencia (2013), el ACV es una metodología que permite identificar y evaluar los impactos ambientales ocasionados por un producto, servicio o proyecto durante todas sus etapas. Es sabido que las acciones humanas, sus actividades y procesos generan impactos en el ambiente, ya que consumen recursos, descargan sustancias al entorno, afectan la flora y fauna y generan problemas como el cambio climático, reducción de la capa de ozono, generación de ozono troposférico, eutrofización de los cuerpos de agua, acidificación del océano, desertificación de suelos, entre tantos más.

En la fuente antes citada (ob. Cit.) se comenta que el principio básico de la metodología del ACV es la identificación y descripción de todas las etapas del producto, proceso o proyecto, desde la obtención de materias primas, pasando por la producción, la distribución y consumo final del producto, hasta su posible reutilización, reciclaje o bien, la disposición final.

No se puede generalizar sobre las etapas o fases del ciclo de vida que se deben considerar, pues cada proyecto o proceso es diferente de otros, por lo que tiene sus propias y muy particulares etapas, incluso actividades semejantes o hasta virtualmente iguales pueden tener etapas que se diferencien entre sí en función del ejecutor o productor, sin embargo, intentando generalizar, las etapas del ciclo de vida pueden ser las que se muestran en la siguiente figura:

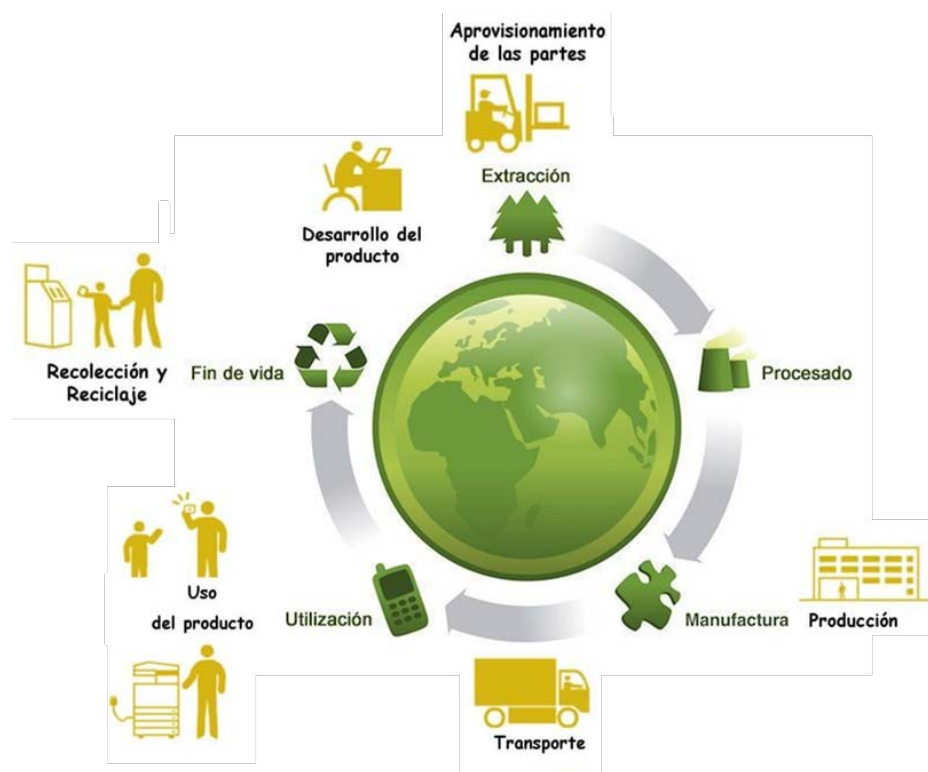


Figura 3-9. Etapas del Ciclo de Vida. Fuente: editado de ECO Inteligencia (2013) y Geo Innova (s.f.).

ECO Inteligencia (2013) define las etapas del ciclo de vida mostradas en la figura anterior, y el autor del presente trabajo, además, les agrega los posibles impactos, lo que se muestra a continuación:

- **Desarrollo del producto:** o diseño del proyecto, es la etapa conceptual de planificación, justamente en esta etapa es útil el ACV para tomar mejores decisiones.
- **Adquisición de materias primas (o aprovisionamiento de las partes):** que, de acuerdo con el autor del presente trabajo, pueden ser: agua en muchos procesos, semillas para la agricultura y agroquímicos, leche líquida para queseras, carne de pollo o reses para embutidoras, petróleo para refinerías, restos vegetales para productoras de papel, entre tantas opciones, en función del tipo de proyecto o servicio. La obtención de materias primas suele ser una etapa altamente impactante, pues cuando se extraen recursos naturales suelen degradarse los ecosistemas en los que se encuentran; y si la materia prima es el producto de otro proceso previo (por ejemplo, la carne es la materia prima de una embutidora pero es el producto final de procesos previos de cría o ganadería, matanza y frigoríficos), para obtenerla puede que ya se hayan cometido muchos impactos preliminares.
- **Procesado, manufactura o producción:** actividades que convierten las materias primas y energía en el producto deseado. Las fabricas suelen descargar emisiones con contaminantes del aire, vertidos con contaminantes de las aguas, residuos sólidos capaces de contaminar el suelo o el agua, etc.
- **Transporte y distribución:** traslado del producto final al cliente. El traslado terrestre, marino o aéreo consume combustibles fósiles, que emiten contaminantes comunes del aire, gases de efecto invernadero, son ruidosos.
- **Uso, reutilización y mantenimiento:** empleo del producto elaborado a lo largo de su vida en servicio. Luego de empleado el producto, sus empaques, o el mismo producto descompuesto o dañado suele convertirse en residuos sólidos que si no son reciclados o adecuadamente dispuestos, contaminan espacio y otros recursos.

- Reciclaje: comienza una vez que el producto ha servido para la función concebida. Esta es la etapa ideal de cierre, pues reduce los impactos de disposición inadecuada y genera materias primas para el mismo proceso (ciclo cerrado de reciclaje) o para otro proceso productivo (ciclo de reciclaje abierto).
- Gestión de los residuos. Comienza una vez que el producto ha servido a su función y se devuelve al medio ambiente como residuo. Los residuos mal dispuestos, además de lo antes escrito, pueden inducir la proliferación de vectores biológicos, causantes de enfermedades para los seres humanos.

3.4.2. El ACV en el Contexto de las Legislaciones Española

El ACV no está sometido a legislación alguna, aunque su filosofía se refleja en los principales reglamentos relacionados con los sistemas de gestión ambiental y prevención desarrollados por la Comisión Europea, así como en las últimas regulaciones legislativas españolas. (Haya, 2016, p. 13)

Las normativas españolas más reciente que incluyen la filosofía del ACV en algunos de sus puntos, se mencionan a continuación (Haya, 2016, p. 15):

- Ley 5/2013, de 11 de junio, por la que se modifican la Ley 16/2002, de 1 de julio, que versa sobre prevención y control integrado de la contaminación.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, que versa sobre residuos y suelos contaminados.
- Ley 11/97, de 24 de abril, que versa sobre envases y residuos de envases.
- Ley 16/2002, de 1 de julio, que versa sobre prevención y control integrados de la contaminación.
- Ley 10/98, de 21 de abril, que versa sobre Residuos.

3.5. Aplicación del ACV en Tratamientos de Aguas Residuales

Rodríguez, García y Zafra (2016) desarrollaron “el análisis del ciclo de vida aplicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales”, en ese trabajo aplican el ACV como técnica de gestión ambiental en las plantas de tratamiento de aguas residuales, identificando los recursos usados y los generados, los que son emitidos al ambiente (agua, aire y suelo) a lo largo de todo el ciclo de vida, como una opción válida para la estimación y/o valoración de los impactos o consecuencias ambientales que puedan generar en las fases de prefactibilidad y factibilidad de las plantas de tratamiento de aguas residuales. (p. 617)

La aplicación del ACV en una planta de tratamiento de aguas residuales es considerada una gestión ambiental específica, para establecer las emisiones ambientales de los procesos y operaciones involucradas para la descontaminación del agua y luego convertirlos en indicadores ambientales de la línea de agua, biogás y sólidos, conociendo así su desempeño ambiental global y posteriormente analizarlos con respecto al ambiente adyacente desde un ámbito de producción de agua residual tratada, uso y eliminación de un producto dentro de la planta de tratamiento. (Rodríguez, et al., 2016, p. 618)

Esta investigación fue del tipo exploratoria y retrospectiva; y la fuente de la información fue la literatura especializada (ob. Cit., p. 619). El ACV en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) convencionales es una herramienta que permite la estimación y/o valoración de los impactos ambientales que puedan generar las fases de planeación y construcción de las PTAR. Los primeros estudios de aplicación de ACV en PTAR convencional fueron en los años 90, los cuales fueron utilizados para evaluar la sostenibilidad del tratamiento de aguas residuales en Holanda, y su aplicación fue a nivel regional. (ob. Cit., p. 624)

La estimación de las emisiones durante la operación de la PTAR puede ser más significativa que durante la construcción, por lo que se requiere implementar una prevención integrada de la contaminación y un control exhaustivo durante esta etapa para identificar las posibles fuentes de emisiones hacia el ambiente. Actualmente,

se realizan ACV para PTAR para la comparación de tecnologías, determinar la influencia del consumo de energía y evaluar el reúso del agua residual (ob. Cit., p. 624). Debido a la naturaleza extensa de la aplicación ACV en el ámbito ambiental, debe delimitarse el análisis según factores como las hipótesis, la disponibilidad de datos, limitaciones económicas, técnicas, el tipo de aplicación y el destinatario previsto (ob. Cit., p. 625).

El ACV de una PTAR debe aplicarse de manera integral, considerando la línea de aguas, lodos y biogás, para conocer la influencia de estos en el medio, al momento de la operación de la PTAR y alcanzar los límites de descarga de su efluente tratado. Al aplicar el ACV para evaluar la sostenibilidad en un sistema de tratamiento biológico aerobio, según varias PTAR de los países bajos, se ha determinado que las emisiones de CO₂, en este tipo de tecnologías se encuentra entre 0,228 a 0,438 kg/m³ de agua residual, producto de la emisión en sí (gases efecto invernadero, GEI) que se da por oxidación de la materia orgánica en los reactores biológicos aerobios, y de los procesos preliminares que derivaron en la generación del agua residual, como la producción del agua potable, remoción de contaminantes, consumo eléctrico, uso de productos químicos, construcción de la PTAR, operación y mantenimiento, y demolición de la misma cuando se venza su vida útil, entre otros aspectos (ob. Cit., p. 625), así mismo, emite CH₄ en el orden de 11 a 310 g/hab.año. (ob. Cit., p. 626)

Hay que resaltar que muchos ACV no tienen en cuenta la recolección del agua residual, ni el bombeo ni los colectores e interceptores. Varias aplicaciones de ACV indican que la construcción de la PTAR, así como el sistema de recolección de aguas residuales, aporta un 0,5% de la carga ambiental total del sistema, al igual que tiempo de vida útil, que resulta insignificante en el ACV. De modo que muchos ACV en sus análisis, excluyen la fase de la construcción de la PTAR, así como su mantenimiento, desmantelamiento, y línea de olores; y solo se enfocan en la operación de la PTAR, dado que el interés principal en esos casos suele ser determinar el efecto ambiental de la PTAR con la cuenca hídrica y su medio. (ob. Cit., p. 626)

También se determinó que el factor de consumo de energía, como contribuyente del agotamiento de los recursos naturales, el cual resultó ser muy bajo, y otros factores como la construcción y el uso de productos químicos no fueron significativos en la evaluación con ACV. Ampliando lo relacionado al consumo energético, típicamente la aireación consume aproximadamente el 50% de la energía total de la PTAR, el tratamiento de lodos residuales aproximadamente el 30% y la elevación de la cabeza hidráulica o bombeo aproximadamente el 15%. (ob. Cit., p. 625)

El ACV en PTAR se ha utilizado para la planificación y selección de los tratamientos de la misma, incluyendo la variable ambiental en su diseño, dado que el ACV es una herramienta de toma de decisión para la disminución de impactos ambientales y, por eso, se debería incluir en el proceso de diseño de ingeniería de la PTAR. Algunas aplicaciones de ACV en PTAR han determinado que los impactos ambientales generados por la PTAR, como eutrofización y calentamiento global, son los factores más costosos y significativos, por lo tanto, al reducir la utilización de combustibles fósiles y sustituirlos por energías renovables, reduce la emisión de contaminantes del aire. (ob. Cit., p. 627)

Una dificultad presentada en el inventario de un ACV es la disponibilidad, homogeneidad y calidad de los datos de las PTAR; las fuentes más típicas de datos son las estimaciones de expertos (literatura) y los datos estandarizados. Para que exista un ACV adecuado y confiable, se deben tener datos de los diseños de la PTAR, que define cuantitativamente el inventario de los recursos consumidos y las emisiones producidas. (ob. Cit., p. 627).

El trabajo realizado por Rodríguez, García y Zafra (2016) aporta datos relevantes para la ejecución del ACV de las EDAR de las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales, como conocer la importancia de la aplicación del ACV en PTAR, mencionar los datos requeridos para el inicio del ACV, las emisiones de GEI de EDAR convencionales, las etapas más impactantes de las PTAR o EDAR y el empleo de los resultados del estudio para obtener mejoras ambientales.

Otra aplicación de los ACV en PTAR la llevaron a cabo García, Herrera y Rodríguez (2011), quienes realizaron

un ACV en la PTAR Municipal (PTARM) de Yautepec, Morelos, México. En este trabajo se realizó la evaluación ambiental de dicha estructura de depuración de vertidos líquidos, a través de la aplicación de la metodología el ACV, mediante la utilización de una herramienta comercial denominada SIMAPRO. El objetivo de este trabajo fue aplicar el ACV en dos sistemas: 1) en el efluente de agua residual municipal sin tratamiento y 2) en la PTARM que se encuentra operando en malas condiciones y que tiene una descarga directa a un cuerpo natural, lo cual supone un daño al medio ambiente.

El ACV se realizó mediante la utilización de la herramienta SIMAPRO 7, para determinar el impacto ambiental de cada escenario, a través de la comparación de los impactos y las propuestas de mejoras para disminuirlos, siguiendo las etapas de esta metodología y según las normativas respectivas: ISO 14040 e ISO 14044.

En este estudio se utilizaron datos reales, reportados por la planta desde inicios del año 2010 y algunos datos obtenidos de la bibliografía. Se identificaron los impactos al medio ambiente generados por el tratamiento, haciéndose énfasis en aquellos relacionados con el uso posterior del cuerpo de agua que recibe la descarga, tales como eutrofización (con un porcentaje de reducción cercano al 15 % de reducción). (García, et al., 2011)

Así mismo, se realizó un análisis comparativo entre los impactos en los dos sistemas, con y sin tratamiento, analizando la variación en las categorías de impacto estudiadas. Finalmente, se propusieron alternativas de mejora para la reducción de los impactos identificados y cuantificados (García, et al., 2011). Este trabajo es de gran utilidad para la investigación que se está adelantando sobre el ACV de EDAR de las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales, dado que en este último trabajo también se empleará el software SIMAPRO, por lo el trabajo desarrollado por García, et al, (2011) es una guía valiosa para aplicar dicho software.

Por su parte, Riffo (2017) desarrolló un Análisis de Ciclo de Vida para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales: Potencial de Calentamiento Global Generado por PTAR Talagante. El ACV de la PTAR de Talagante se enfocó en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y, por lo tanto, en el Potencial de Calentamiento Global. Este análisis se realizó con el objetivo de evaluar ambientalmente el escenario del proceso actual y futuro, con foco en la gestión energética, a fin de, identificar las actividades que posean un mayor impacto y recomendar acciones que apunten a disminuir dicho impacto sin afectar la operación normal de la planta.

Se analizan tres escenarios: el primero es el actual donde se combustiona el 40% del biogás en una caldera para abastecer de energía al biodigestor y el excedente en antorcha; en el segundo, escenario en el cual el 100% del biogás es combustionando en un motor de cogeneración que produciría energía eléctrica para la planta y energía térmica para el biodigestor; y el tercer escenario corresponde al proyectado al año 2024, que comprende la ampliación de la planta en un módulo de la línea de agua. Riffo (2017)

El resultado del análisis muestra que el total de las emisiones del escenario base (año 2016) fue de 5.100 toneladas (t) CO₂ equivalente (CO₂e). En el nuevo escenario, con cogeneración, se disminuye en un 17% las emisiones anuales de la planta. En el tercer escenario se obtiene un total de 5.000 (tCO₂e) para el año 2024. Las emisiones directas de la planta contribuyen sobre el 60% del total de las emisiones del sistema en todos los escenarios analizados. La emisión más significativa corresponde al óxido nitroso (N₂O) que proviene desde el tratamiento biológico de la planta, aportando más del 70% de las emisiones directas en todos los escenarios analizados. Riffo (2017)

Estas emisiones, al estar dentro del campo de acción directa de la empresa, poseen un alto potencial de disminución. En función de los resultados, se definieron estrategias de mitigación para las emisiones directas de N₂O. Se generaron tres recomendaciones: la primera es la realización de campañas de medición de N₂O, la segunda es la optimización de la aireación del tratamiento biológico, y la tercera es la implementación de la tecnología Anammox sobre las aguas de rechazo. Como proyección se sugiere considerar el Potencial de Calentamiento Global en la toma de decisiones de la empresa, de esta forma, todos los proyectos realizados pueden contribuir a la disminución de la emisión de GEI, y, con ello, a la contención del cambio climático. Riffo

(2017)

En el trabajo del ACV de las EDAR de las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales, se planteó dentro de sus objetivos, determinar el impacto de dichas EDAR por la emisión de GEI o su Potencial de Calentamiento Global, y precisamente en esto se basó la investigación desarrollada por Riffo (2017), por lo que este trabajo es una guía muy útil para la presente investigación.

3.6. Base Legal

En virtud de la Directiva 91/271 de la CEE, que prescribe que todas las poblaciones con población superior a los 5.000 habitantes dispongan de un tratamiento adecuado de las aguas residuales antes del 31 de Diciembre de 2005, fue que la Junta de Andalucía, organismo con competencia para el auxilio técnico y económico de las Corporaciones Locales en materia de abastecimiento y saneamiento a poblaciones, sacó a contratación el "PROYECTO DE CONCENTRACIÓN DE VERTIDOS DE MARTÍN DE LA JARA – LOS CORRALES, SEVILLA". (Castañon, Remesal y Marquez, 2006, TOMO I, p. 8)

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Los ACV en el Marco de las Normas ISO 14.001

De acuerdo con Haya (2016), las normas de referencia para la realización de un ACV son: 1) Norma UNE-EN ISO 14040 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia (ISO 14040:2006), y 2) Norma UNE-EN ISO 14044 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices (ISO 14044:2006), (p. 4).

El desarrollo de un ACV, de acuerdo a la Norma UNE-EN ISO 14040, debe cubrir las siguientes etapas metodológicas (Haya, 2016, p. 18):

- Etapa 1 - Definición del Objetivo y Alcance del ACV: en los objetivos se exponen los motivos por los que se desarrolla el estudio, la aplicación prevista y a quién va dirigido. El alcance consiste en la definición de la amplitud, profundidad y detalle del estudio.
- Etapa 2 - Análisis de Inventario de Ciclo de Vida: esta fase incluye la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema del producto. Por sistema del producto se entiende el conjunto de procesos unitarios conectados material y energéticamente que realizan una o más funciones idénticas.
- Etapa 3 - Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida: durante esta etapa, utilizando los resultados del análisis de inventario, se evalúa la importancia de los potenciales impactos ambientales generados por las entradas y salidas del sistema del producto.
- Etapa 4 – Interpretación: la cual incluye la combinación de los resultados de las dos etapas anteriores, con la finalidad de extraer, de acuerdo a los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan la toma de decisiones.

4.2. Objetivo del ACV

Las poblaciones de Martín de la Jara y Los Corrales son dos municipios de la Provincia de Sevilla que carecen de depuradoras y que vierten sus aguas residuales directamente al ambiente. En el caso de **Martín de la Jara, las aguas son vertidas sin tratar al arroyo Salado**. Debido a esto, **el Estado y la Junta de Andalucía** están promoviendo, en conjunto, las obras de saneamiento y depuración de las aguas de estas localidades para contribuir con el ambiente y dar cumplimiento de la normativa europea de tratamiento de aguas residuales. Las dos tecnologías seleccionadas como propuestas para la depuración de las aguas residuales de ambas poblaciones están basadas en el contactor Biológico Rotativo (CBR) y en los sistemas de filtros verdes en flotación (SFVF) respectivamente. En este sentido, el objetivo del ACV es calcular y comparar los potenciales impactos ambientales de cada tecnología planteada para ambas localidades, y con base en esos resultados elegir la mejor alternativa para el manejo de las aguas residuales de las poblaciones Martín de la Jara y los Corrales.

4.2.1. Motivos del ACV

El presente ACV tiene fines académicos, pues se está desarrollando como eje central de un Trabajo de Fin de Máster de Ingeniería Ambiental, por lo tanto, el trabajo desarrollado debe ser un estudio que demuestre la capacidad crítica y analítica constructiva del investigador en un contexto sistémico; en el cual el mismo debe demostrar el dominio teórico y metodológico de la investigación. Así mismo, este trabajo debe permitir la consolidación del desarrollo de competencias investigativas. Concluido y aprobado de manera satisfactoria, el presente trabajo, además de otros requisitos que se deben cumplir, le permitirá al investigador optar por el título de Máster en Ingeniería Ambiental de la Universidad de Sevilla.

4.2.2. Aplicación del ACV

Pero más allá del motivo académico, se pudo indagar que se elaboró un proyecto titulado “PROYECTO DE CONCENTRACIÓN DE VERTIDOS DE MARTÍN DE LA JARA – LOS CORRALES. (SEVILLA) CLAVE: A5.341.992/0411 EXPEDIENTE: NET 601019”, elaborado por “egmasa Empresa de Gestión Medioambiental - Consejería de Medio Ambiente JUNTA DE ANDALUCIA”, específicamente quienes figuran como responsables de este proyecto fueron: Autor y Director del Proyecto: Luis Ignacio Castañón García; Director de Actuación: José Antonio Remesal Guijarro; y Gerente del Proyecto: José Luis Marquez Arroyo. De aquí y en adelante, este proyecto se citará como Castañón, Remesal y Marquez (2006), el cual fue presentado en el mes de noviembre del año 2006, aunque inició un par de años antes, en el 2004, y fue sometido a licitación, ante el AYESA en el año 2009, por lo que llegó a contar con un presupuesto asignado para su ejecución, sin embargo, este proyecto nunca se ejecutó (no se construyó ni se puso en funcionamiento) y perdió la asignación presupuestaria, como se puede apreciar en el siguiente link:<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.6ffc7f4a4459b86a1daa5c105510e1ca/?vgnextoid=05cf8706a8bb9510VgnVCM1000001325e50aRCRD&vgnnextchannel=170f4f6ec5f87510VgnVCM2000000624e50aRCRD>.

Por lo que se está en espera de que el proyecto se retome, de que vuelva a tener presupuesto asignado y que sea finalmente construido y puesto en funcionamiento para que controle la contaminación que, actualmente, se descarga sobre el río Salado, entre otros impactos más, por ejemplo, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), sobre todo, durante la etapa de operación de la EDAR. Es necesario destacar, que al revisar el proyecto de concentración de vertidos de Martín de la Jara y Los Corrales, presentado por Castañón, Remesal y Marquez (2006), se aprecia que la EDAR debería contar con las unidades de tratamiento que se aprecian en la figura que se muestra a continuación:

4 Opciones de proceso

Se han estudiado las siguientes alternativas de proceso biológico que se adaptan al caso particular de la E.D.A.R.:

- Fangos activados de media carga.
- Fangos activados en aireación prolongada.
- Canales de oxidación.

Para poder determinar los costes de construcción y de explotación de cada una de las alternativas es necesario realizar un predimensionamiento de las distintas estaciones. Las alternativas difieren sólo en el proceso biológico, siendo el resto de fases, primario y línea de fangos idénticas en todas ellas.

La línea completa de tratamiento sería la siguiente;

- Línea de agua
- Desbaste de gruesos
- Tamizado
- Desarenado
- Desengrasado
- Medidor de caudal
- Decantación primaria
- Tratamiento biológico
- Decantación secundaria
- Línea de fangos
- Espesado
- Deshidratación por centrifugación

Figura 4-1. Opciones de EDAR originalmente consideradas en el proyecto de concentración de vertidos de Martín de la Jara y Los Corrales. Fuente: Castañón, Remesal y Marquez (2006), Tomo I (p. 423).

Como se aprecia, la EDAR tendrá, además de la red cloacal que una los vertidos de ambas poblaciones, las siguientes unidades de depuración: 1) desbaste de gruesos, 2) tamizado, 3) desarenado, 4) desengrasado, 5) medidor de caudal, 6) decantación primaria, 7) tratamiento biológico (para el cual consideraron tres opciones: 7.1) fangos activos de media carga, 7.2) fangos activos de aireación prolongada, y 7.3) canales de oxidación, los tres son procesos análogos a lodos activos), 8) decantación secundaria, y 9) tratamiento

de fangos: 9.1) espesado y 9.2) deshidratación por centrifugación. Esto permite ver que originalmente se consideró una EDAR convencional basada en lodos activos y no en biodiscos; menos aún llegaron a considerar el tratamiento de filtros verdes flotantes de helófitas.

Aun así, fue necesario comprobar si ya se contaba con el diseño de la EDAR, aunque se basara en lodos activos, por lo que en el Tomo II del mencionado proyecto de concentración de vertidos de Martín de la Jara y Los Corrales se apreció el sub-título “Anejo nº 10. Diseño de Proceso de Tratamiento” (p. 171) en el que debería haberse presentado dicho diseño de EDAR, se observó que dice “No Procede” (p. 172) por lo que el proyecto original menciona las unidades que debería tener la EDAR, donde nunca consideraron biodiscos ni tratamientos con helófitas, ni diseñaron ninguna unidad de tratamiento como tal, menos aun la EDAR en total.

Esto es una desventaja, pero también una ventaja para la presente investigación. Desventaja, pues de contar con el diseño de la EDAR se contaría con el diseño de varias unidades, que daría información específica sobre su consumo de terreno, de materiales de construcción, costos de construcción, consumo energético, eficiencia, emisiones de GEI, entre otros que facilitarían el proceso de evaluación de impacto. Pero ventajas porque, de no haber una EDAR diseñada, la EDAR originalmente considerada podría estar sujeta a cambio, para incorporar en la EDAR convencional el proceso de biodiscos en lugar de lodos activos, y para presentar una segunda propuesta de EDAR basada en el tratamiento del agua con plantas helófitas; así mismo, el proyecto original en el Tomo I, cuenta con un estudio ambiental (p. 330 – 340) en el que ya se determinaron varios impactos ambientales, que pueden ser considerados en el presente proceso de evaluación del ACV, dado que varios de esos impactos de la EDAR convencional aunque sea para una de lodos activos, pueden aplicar, para una EDAR de biodiscos (por su puesto, habrán impactos particulares que no apliquen).

Todo lo antes expuesto en este apartado indica que, aunque el presente proyecto de evaluación del ACV de dos opciones de EDAR para el vertido y tratamiento conjunto de las aguas residuales de las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales, no constituye el diseño exhaustivo de dichas EDAR, si será aplicado como una herramienta en la toma de decisiones para seleccionar la mejor tecnología de depuración de aguas residuales, entre dos opciones posibles, una EDAR convencional centrada en Contactores Biológicos Rotativos (CBR) o biodiscos, y una EDAR más natural, basada en sistema de filtros verdes en flotación, eligiendo aquella que satisfaga los lineamientos legales de vertido, que sea económica en la ocupación de terreno, construcción, y operación y mantenimiento, pero que además emita menos cantidad de GEI a la atmósfera, entre otros impactos tanto ambientales como sociales y económicos.

4.2.3. ACV Dirigido A

Inicialmente, el presente trabajo está dirigido al comité evaluador, integrado por el tutor de la investigación y demás respetables jurados asignados por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad de Sevilla, quienes tienen la responsabilidad de evaluarlo inicialmente y de sus correcciones se generarán aportes que mejorarán o enriquecerán la presente propuesta, con miras a que posteriormente pueda ser empleada por los organismos responsables de tomar decisiones para que elijan la mejor opción de EDAR para las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales.

4.3. Alcance del ACV

El análisis de ciclo de vida (ACV) de una EDAR permite estudiar la sostenibilidad de las fases de construcción, operación y desmantelamiento de las estaciones depuradoras de aguas residuales e igualmente es útil para optimizar procesos o comparar tecnologías de depuración, como se quiere en el presente caso. El alcance de esta herramienta en cuanto a las fases del ciclo de vida de una EDAR es materia de discusión debido a su complejidad.

De las cuatro fases de un proyecto de EDAR (diseño, construcción, operación y mantenimiento, y ampliación, actualización o desmantelamiento), la fase de operación de las EDAR tiene un impacto mucho mayor que las de construcción y desmantelamiento (Lundie et al., 2004), (Renou, S el al, 2008).

Sin embargo, no se puede ignorar los impacto de la construcción, pues la adquisición del terreno es costosa, la modificación del terreno implica la remoción de capa vegetal, la alteración de la topografía original y la generación de escombros (restos vegetales, así como restos de tierra y rocas) que deben disponerse adecuadamente, y la construcción como tal implica emplear materia prima como materiales de construcción: arena, cemento, agua, cabillas, cableado, paneles electrónicos, tuberías, accesorios de tubería, bombas y otras maquinas, etc., todo lo cual ya ha consumido previamente recursos naturales en su construcción y que suman impacto al emplearlos; y, finalmente, se ocupa el terreno con la EDAR, al menos por los años de vida útil del proyecto.

Puesto que contar con el inventario de datos detallados de todas las etapas del ciclo de vida de la EDAR es complicado, a menos que se cuente con un proyecto detallado que involucre todas esas etapas, resulta improcedente realizar un ACV detallado de todas las etapas de la EDAR, sin embargo, se consideraran varias de las etapas del ciclo de vida de manera superficial, con los datos que es posible conseguir y establecer, para realizar el análisis. Aunque se dará más peso en la evaluación de la fase de operación.

4.3.1. Amplitud del ACV

El ACV realizado se circunscribe en la evaluación de los potenciales impactos ambientales, mediante la herramienta del ACV, de dos diseños de EDAR: 1) basada en Contactores Biológicos Rotativos (CBR), y 2) basada en sistema de filtros verdes en flotación; propuestas para el manejo de las aguas residuales de las poblaciones Martín de la Jara y los Corrales, Provincia de Sevilla, España.

4.3.2. Profundidad del ACV

Se prediseñaron los aspectos fundamentales para determinar los principales impactos derivados de las dos opciones de EDAR, lo que permitió determinar la extensión de la ocupación de terreno, los costos de construcción, operación y mantenimiento, personal mínimo requerido, cumplimiento de los limites legalmente establecidos de vertido, y emisiones de GEI, a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de ambas EDAR, pues ese ACV aportó información de base para la toma de decisiones sobre cuál es la mejor EDAR que se debería considerar para depurar los vertidos de las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales.

4.3.3. Detalles del ACV

- El prediseño de los aspectos fundamentales de las EDAR basadas en: 1) Contactores Biológicos Rotativos (CBR), y 2) basada en sistema de filtros verdes en flotación; se basó en los datos y parámetros de diseño propuestos por la literatura especializada, en proyectos detallados centrados en estas tecnologías disponibles vía web, así como en los avances tecnológicos y recomendaciones que proponen empresas especializadas en la materia que cuentan con sitios web de consulta.
- La evaluación del impacto ambiental se realizó identificando los impactos que se derivan de cada una de las etapas del ciclo de vida de las EDAR, de acuerdo con la literatura especializada, la experiencia del investigador y considerando algunos impactos previamente determinados el proyecto de concentración de vertidos de Martín de la Jara y Los Corrales (Tomo I, p. 430 – 440); y además, considerando la evaluación del ACV a partir de la aplicación de un software especializado, Simapro (versión SimaPro 9.1.1 Demo).

- Con los resultados de los impactos asociados a las etapas del ciclo de vida de ambas EDAR se contó con la información deseada para descartar una de ellas y seleccionar la otra como la mejor opción para ser implementada.

4.3.4. Unidad Funcional del ACV

Las unidades funcionales que se proponen estudiar son las EDAR a las que se les pretenden determinar los impactos, para la toma de decisiones sobre cual es la mejor opción a elegir. El objetivo de establecer una unidad funcional es el de proporcionar una referencia para todas las entradas y salidas, necesaria para asegurar la representatividad de los resultados y que sean totalmente comparables. Las EDAR a estudiar tienen diferencias entre sí, pues aunque se puede asumir el mismo pretratamiento (como el desbaste) y el mismo tratamiento primario (como la sedimentación) para ambas, así como el mismo tratamiento terciario (cloración), el tratamiento secundario y de lodos las diferencia, dado que en una el tratamiento secundario son biodiscos seguidos de sedimentador secundario, en la otra el tratamiento secundario será el filtro verde con macrófitas (helófitas) en flotación sin sedimentador secundario. La EDAR con biodiscos requiere un espesador de lodos junto con lechos de secado, mientras que la EDAR con macrófitas, luego de cierto periodo de operación, que mínimo es de un año, debe ser limpiada removiendo sólidos decantado y digeridos, así como exceso de vegetación flotante, que no se dispone en espesadores de lodos y menos aun en lechos de secado, sino que ese lodo puede desinfectarse y acondicionarse químicamente para ser sometido a un proceso de compostaje y generar abonos microbiológicamente seguros. Además, las EDAR se diferencian entre si en cuanto al tamaño del área requerida, la calidad del agua tratada, los costos de construcción y operación, entre otras diferencias que a su vez derivan en impactos diferentes; que deben determinarse para elegir la mejor opción.

4.3.5. Escenarios de Cada EDAR

Se ha considerado que la depuración de las aguas residuales municipales generadas en las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales puede realizarse en dos tipos de EDAR, una de ellas centrada en el tratamiento secundario biológico aerobio del tipo biopelícula adherida en un soporte giratorio con forma de cilindro, visto lateralmente como un disco, por ello, este tipo de tecnología se conoce con el nombre de biodisco o contactor biológico rotativo, sin embargo, en este tipo de EDAR se requieren tratamientos adicionales, como pre-tratamientos para reducir contaminantes sólidos gruesos y medianos del agua, tratamientos primarios que permitan la remoción de sólidos finos y material flotante, luego de lo cual si es factible hacer el tratamiento mediante los biodiscos.

Sin embargo, los contactores biológicos rotativos transformarán los contaminantes orgánicos biodegradables solubles en insolubles, que adquirirán la forma de floculos (floc) biológicos, los cuales pueden ser removidos del agua mediante decantación secundaria, luego de lo cual es posible clorar el agua para desinfectarla, reduciendo la concentración de contaminantes biológicos antes de descargarla al medio, el río Salado. Adicionalmente, la EDAR basada en biodiscos requiere tratamientos de lodos, generados en el pre-tratamiento, así como la decantación primaria y secundaria, los cuales suelen espesarse en un decantador de lodos, para luego ser dispuestos en lechos de secado. Todo esto permite comprender que una EDAR basada en biodiscos es compleja, involucra varias unidades de tratamiento que deben diseñarse, construirse, operarse y mantenerse hasta el cumplimiento de su vida útil, luego de lo cual deben desmantelarse. A lo largo de esas etapas de su ciclo de vida, se generan impactos ambientales, sociales y económicos tanto positivos como negativos.

Por su parte, la EDAR basada en sistema de filtros verdes en flotación emplea humedales, o empozamientos del agua residual en los que ingresa el agua residual cruda y se descarga el agua, luego de pasar por este tratamiento en el que se emplean plantas acuáticas flotantes, las cuales desarrollan un sistema radicular denso que se entrelaza con el del resto de plantas, que sirve como soporte para microorganismos que consumen los contaminantes biodegradables del agua, por lo que el floc biológico formado junto con los sólidos gruesos y medianos decantan

dentro del mismo humedal, lo que podría derivar en la colmatación de este espacio, por ello debe evaluarse la posibilidad de emplear pre-tratamientos y tratamientos primarios antes del sistema de filtros verdes en flotación. En este tratamiento suele controlarse la población microbiana, sin embargo, el vertido no suele cumplir con los estándares al respecto, por lo que el agua residual tratada en el sistema de filtros verdes en flotación debe desinfectarse en un tratamiento posterior de cloración antes de descargarse en el río Salado. Cuando se le hace mantenimiento a este tipo de tratamiento, suelen removerse el exceso de plantas acuáticas producidas, para evitar que las mismas tapen por completo la unidad e induzcan condiciones sépticas al bloquear el intercambio gaseoso entre el agua y el aire, además, dependiendo de la cantidad de sedimentos retenidos o decantados allí, también será necesario removerlos, para devolverle la capacidad requerida para realizar la depuración.

Por ello, puede ser necesario emplear unidades de tratamiento para los lodos de este tipo de EDAR. Como se aprecia, la EDAR basada en sistema de filtros verdes en flotación también puede ser compleja o requerir de varias unidades para su adecuado funcionamiento. Por lo que también, fue necesario determinar las diferentes etapas de su ciclo de vida, con miras a determinar los impactos tanto positivos como negativos que de ellas se generan, para compararlos con los impactos de la EDAR de biodiscos, y así, seleccionar la mejor opción de depuración de las aguas residuales municipales de las poblaciones de Martín de la Jara y Los Corrales.

4.3.6. Límites del Sistema

Los límites de las EDAR a evaluar mediante el ACV, están dados espacialmente, por las comunidades que generan las aguas residuales municipales a ser tratadas, las cuales son Martín de la Jara y Los Corrales, así como el terreno que se seleccione como la mejor opción para la implementación de la mejor EDAR o la menos impactante de manera negativa con el ambiente. Por lo tanto, los límites incluyen a cada una de las unidades que compondrá la EDAR seleccionada, por lo que se deben evaluar no solo estas, sino también, las unidades de la EDAR rechazada. Espacialmente, los límites del sistema deben considerar al río Salado, dado que es el que actualmente está recibiendo los vertidos crudos de las aguas residuales de las comunidades de interés, y este será el mismo cuerpo de agua que recibirá al agua residual tratada, una vez se construya y ponga en funcionamiento la mejor EDAR.

En cuanto a los límites temporales, se deben considerar cuatro etapas en el ciclo de vida de la EDAR a implementar, los cuales son: el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento, y la clausura. La etapa de diseño incluye los dimensionamientos, detalles de las unidades, las estructuras, la selección de tuberías y el trazado de tuberías, los accesorios como válvulas, las ampliaciones, reducciones, codos, Tees, selección y evaluación teórica de equipos como motores, bombas, compresores, entre otros; cálculos de replanteo del terreno, movimientos de tierra y de preparación del terreno seleccionado, en función de su topografía original, para que el mismo sea apto para la construcción de la EDAR. Así mismo, se deben elaborar los planos y detalles que permitirán la instalación de las obras civiles, eléctricas, electrónicas, mecánicas, químicas, entre otras, que se hayan considerado para la EDAR.

Por su parte, la etapa de construcción de la EDAR se basa en seguir todas las instrucciones plasmadas en la etapa de diseño, por lo que se inicia con la adaptación del terreno seleccionado, para que su topografía modificada cumpla con los requerimientos del proyecto. Posteriormente se inicia con la construcción de las diferentes unidades, en sus obras civiles, instalación de tuberías y accesorios, compra e instalación de equipos mecánicos, e instalación de las obras eléctricas y electrónicas (como por ejemplo, los paneles de control); así como la construcción de las oficinas administrativas de la EDAR, y los espacios que ocuparan los empleados de la organización, es decir, sus baños, comedores, sala de descanso y otros afines; e incluso la construcción de los silos o almacenes de reactivos que se emplean en el tratamiento del agua, por ejemplo el cloro, y la construcción de los equipos dosificadores de reactivos, de las unidades de tratamiento de los lodos, y de los almacenes temporales de los residuos generados por el funcionamiento de la EDAR.

La etapa de operación y mantenimiento es muy particular o dependiente del tipo de EDAR que se va a construir, ya que no se opera ni mantiene igual un biodisco que un sistema de filtros verdes en flotación,

puesto que el primero requiere de motores que giren, los cuales consumen electricidad y deben mantenerse lubricados, mientras que el tratamiento con plantas acuáticas requiere de condiciones climáticas apropiadas para el desarrollo de estas especies y de un control en el número de plantas para conseguir que el tratamiento sea idóneo y no se generen condiciones sépticas. Además, como ya se explicó, cada una de estas EDAR puede estar compuesta por diferentes unidades de tratamiento, cada una de las cuales requiere de una operación y mantenimiento muy particular.

Finalmente, cumplido el ciclo de vida estipulado para la EDAR, existen dos opciones, modernizarla o ampliarla, o en su defecto, demolerla para establecer una nueva. Todo dependerá del crecimiento demográfico de las poblaciones a las que sirve la EDAR, pues si esas comunidades crecen en gran medida, así mismo lo hará el caudal de sus aguas residuales, por lo que es posible que las unidades de tratamiento de la EDAR en unos años futuros, sean pequeñas para tratar los veritos. Así mismo, el paso de los años las deteriorará, por más que se le haga mantenimiento. Así que dependiendo del nivel de deterioro, de la disposición de nuevas tecnologías y del crecimiento demográfico, entre otros aspectos, dirá, si la EDAR debe ser modernizada o destruida.

5 RESULTADOS

5.1. Ubicación General de las Comunidades de Interes

Los dos sistemas de tratamiento de aguas residuales, a los cuales se les plantea hacer los ACV, son alternativas propuestas de construcción para depurar las aguas residuales de las poblaciones de Martín de la Jara y Los

Corrales. La Población de Martín de la Jara está localizada a 109 km al Este de la Ciudad de Sevilla. Está constituida por 2747 habitantes, tiene una superficie de 49,80 km² y está ubicada a una altitud de 405 msnm. La población de Los Corrales también se ubica al Este de Sevilla y a 2 km de la población de Martín de la Jara. Está constituida por 4081 habitantes, tiene una superficie de 66 km² y está situada a una altitud de 385 msnm. El mapa donde se aprecia la ubicación de estas dos comunidades es el siguiente:

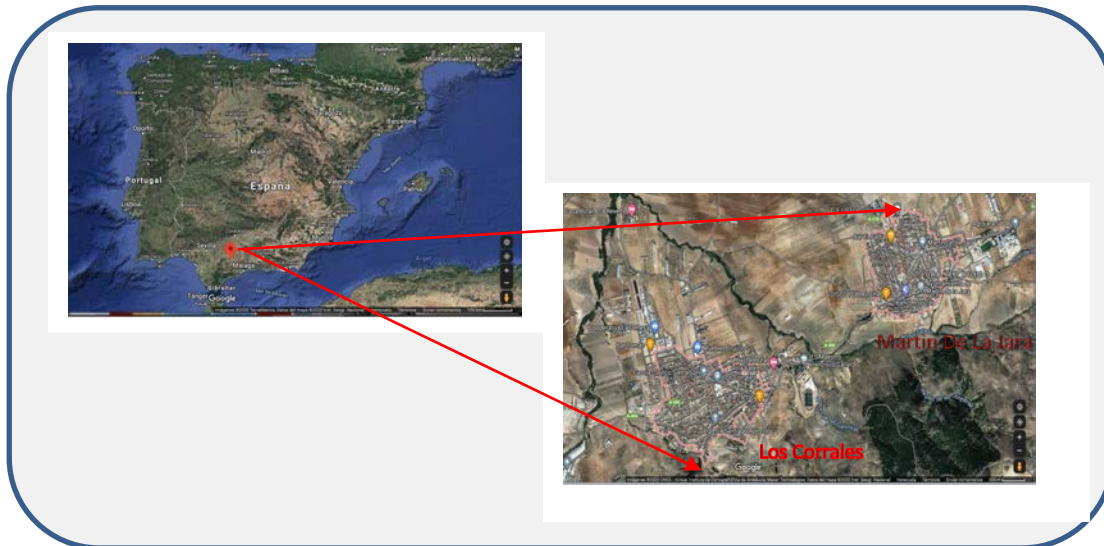


Figura 5-1. Ubicación de las poblaciones de Martín de la Jara y los Corrales.

5.2. Estudios Poblacionales

El objetivo de este estudio poblacional de las comunidades de Martín de la Jara y Los Corrales fue justificar y determinar los parámetros de diseño de la infraestructura a proyectar, tal y como se aprecia en Castañón, et al., 2006 (TOMO I, p. 22). Para ello se partió de un análisis de la situación actual para ese momento, año 2005-2006, de la población, y se realizó una prospectiva a un horizonte de 25 años en el futuro (2030). El estudio de población se basó en los datos existentes, provenientes de censos y de padrones municipales que se actualizaban anualmente, y de los que se derivan del planeamiento vigente ó en desarrollo. Con estos datos se emplean una serie de modelos de crecimiento de población para la determinación de la población de diseño ó población en el horizonte. Dicho modelo contempla tanto la evolución de la población fija como la estacional. Para comparar los resultados se ha elaborado una tabla resumen poblacional para cada uno de los municipios objeto de estudio, que se aprecia en la siguiente figura:

ESTUDIO DE POBLACIÓN PARA MARTÍN DE LA JARA		POBLACIÓN DE DERECHO 2.030	POBLACIÓN ESTACIONAL 2.030	POBLACIÓN HORIZONTE 2.030
MODELOS	ARITMÉTICO	3.066	411	3.477
	GEOMÉTRICO	3.109	411	3.520
	TASA CRECIMIENTO	2.726	411	3.137
	CURVA LOGÍSTICA	2.726	411	3.137
	M.O.P.T.	2.667	411	3.078
ESTUDIO DEL CONSORCIO DE AGUAS DE SEVILLA		-	-	3.834
ESTUDIO DE POBLACIÓN PARA LOS CORRALES		POBLACIÓN DE DERECHO 2.030	POBLACIÓN ESTACIONAL 2.030	POBLACIÓN HORIZONTE 2.030
MODELOS	ARITMÉTICO	4.556	386	4.942
	GEOMÉTRICO	4.611	386	4.997
	TASA CRECIMIENTO	4.099	386	4.485
	CURVA LOGÍSTICA	4.093	386	4.479
	M.O.P.T.	4.241	386	4.627
ESTUDIO DEL CONSORCIO DE AGUAS DE SEVILLA		-	-	6.177

Figura 5-2. Proyecciones poblacionales para el año 2030 de Martín de la Jara y Los Corrales. Fuente: Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 22.

De esa proyección poblacional se ha adoptado como población en el año horizonte (2030) el valor mayor de los obtenidos, tanto para Martín de la Jara como para Los Corrales. Este valor ha sido el obtenido a partir del estudio de poblaciones del Consorcio de Aguas de la Sierra Sur. Así que los datos adoptados son (Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 23):

- Martín de la Jara: 3.834 habitantes para el año 2030
- Los Corrales: 6.177 habitantes para el año 2030
- Martín de la Jara y Los Corrales (en conjunto): 10.011 habitantes para el año 2030

5.3. Clima de las Comunidades de Interes

La precipitación es uno de los caracteres más definitorios del clima. Es el principal factor controlador del ciclo hidrológico en una región. Se han determinado los siguientes datos: precipitación media anual, precipitación media mensual, y precipitación máxima en 24 h. La precipitación media anual va desde valores de 684 mm a 502 mm. La distribución temporal de las precipitaciones a lo largo de un año presenta dos máximos relativos centrados en el otoño y en el invierno. Los meses de julio y agosto presentan los mínimos de precipitación, con una media próxima a los 0 mm. (Castañón, et al., 2006, TOMO I, p. 16 - 17)

Por su parte, la temperatura media anual de la zona del proyecto es de 17°C, alcanzando el máximo durante los meses de julio y agosto, con valores que oscilan en torno a los 27°C de media. Por otra parte las temperaturas mínimas corresponden a los meses de diciembre y enero, con valores en torno a los 9°C. No obstante, en cuanto a las temperaturas extremas se refiere, los valores máximos son muy elevados y se presentan, principalmente, en el mes de julio, con valores superiores a los 40°C. La temperatura media de máximas del mes más cálido es de 32,1°C en la Estación del Saucejo y los 35,3°C en la estación de Osuna. Los valores mínimos de temperatura tienen lugar entre diciembre y enero, con valores que oscilan entre 1,0°C y 2,0°C. La temperatura media de mínimas del mes más frío es de -0,6°C en la Estación del Saucejo y de 0,2 °C en la estación de Osuna. La oscilación máxima de las temperaturas medias mensuales es de 17,4°C en la estación “El Saucejo” y de 17,5°C en la estación “Osuna S.E.A.”. El periodo frío o de heladas es de 3 meses en la estaciones “El Saucejo” y “Osuna S.E.A.”. El periodo cálido es de 2 meses en la estación “El Saucejo” y de 4 meses en la estación “Osuna S.E.A.”. (Castañón, et al., 2006, TOMO I, p. 17)

5.4. Pre-Diseños de las EDAR

Se sugirió, para los municipios de Martín de La Jara y Los Corrales, una solución de estación depuradora conjunta y dos ramales de colectores conectados con la misma. La EDAR se ubicaría en las proximidades de la confluencia entre los arroyos Salado y Hondo. La alternativa seleccionada en el proyecto consiste en el diseño de un colector que concentra los vertidos de ambas localidades, desembocando en una única EDAR situada en el polígono 8, parcela 23, de Los Corrales, en la confluencia de la Cañada Real de Málaga con la carretera comarcal A-378, al Norte de dicho municipio. (Castañón, Remesal y Marquez, 2006, TOMO I, p. 8)

El proyecto de Castañón, Remesal y Marquez (2006) comprende la concentración de las aguas residuales y vertidos de las localidades de Martín de la Jara y Los Corrales, mediante dos ramales principales de colector que se unen en uno sólo, antes de desembocar en la EDAR conjunta para ambos municipios. En ese proyecto se diseñaron los colectores que concentran los vertidos y cuatro aliviaderos en cada punto de vertido; es decir, no se diseñó la EDAR como tal. El colector A1 recoge las aguas residuales vertidas desde Martín de La Jara hacia el Arroyo Salado, discurre por la margen derecha de dicho arroyo. El colector A2 recoge las aguas residuales de la red de saneamiento de la zona Oeste de Los Corrales, este colector discurre por la margen izquierda del Arroyo de la Jara. Al inicio de estos dos tramos A1 y A2 se han proyectado los aliviaderos J1 y C3 respectivamente. Tras cruzar el tramo A2 el Arroyo de la Jara se une al tramo A1 desembocando en el colector A. Este tramo discurre por la margen derecha del Arroyo de la Jara. (TOMO I, p. 9)

Los colectores B y B1 recogen las aguas residuales vertidas desde Los Corrales hacia el Arroyo Hondo. Ambos discurren por la margen derecha del mismo. Al inicio de B y B1 se han diseñado los aliviaderos C1 y C2 respectivamente. Los colectores A y B se unen desembocando en el colector C, en las proximidades de la confluencia de los Arroyos Hondo y de La Jara. Este colector C discurre por la margen derecha del Arroyo de la Fuente del Esparto hasta la EDAR. La planta de la conducción se ha realizado con los menores

cambios de dirección posibles, disponiéndose pozos de registro en todos los cambios de alineación, tanto en planta como en alzado, y en los tramos medios cada 40 m, aproximadamente. La tubería será de PVC Rígido de Diámetro Exterior Nominal igual a 315 mm. Este diámetro aumenta a 400 mm en el tramo último de tubería, en el colector C, que llega hasta la EDAR. Los colectores irán enterrados a profundidad variable con sección de talud 1:1 (Castañón, et al., 2006, TOMO I, p. 9). El resumen del diseño de la red cloacal, es decir, sus diferentes colectores, materiales, longitudes y diámetros, se aprecia en la siguiente figura:

COLECTOR	Longitud (m)	DN (mm)	Tipo de Material
A1	1.128,35	315	P.V.C.
A2	423,20	315	P.V.C.
A	1.360,18	315	P.V.C.
B1	684,40	315	P.V.C.
B	430,64	315	P.V.C.
C	1.411,30	400	P.V.C.

Figura 5-3. Resumen del diseño de la red cloacal que une el vertido de Martín de la Jara y Los Corrales. Fuente: Castañón, et al., 2006, TOMO I, p. 9.

Esta red cloacal se aprecia en el plano de situación que se muestra a continuación:

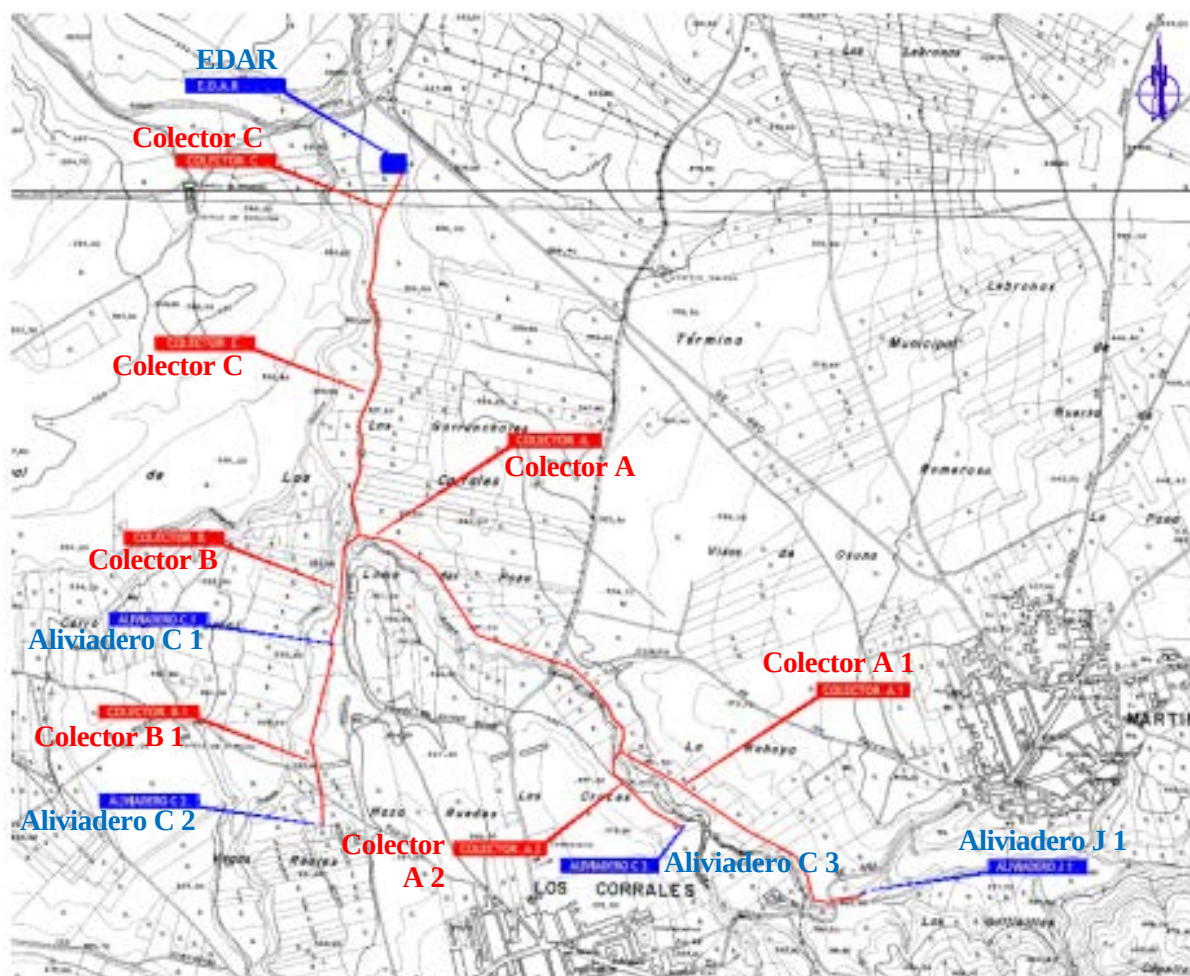


Figura 5-4. Plano de situación de la red cloacal conjunta Martín de la Jara – Los Corrales. Fuente: Castañón, et al., 2006, TOMO I, p. 10.

5.4.1. Caudal del Agua Residual

Se parte de un estudio de Aforos y Analítica redactado por la empresa DBO5, en donde se describe la caracterización de los vertidos de las dos localidades (Martín de la Jara y Los Corrales). Este informe fue realizado con fecha de Abril de 2005 y se refleja en el proyecto elaborado por Castañón, et al. (2006), (TOMO I, p. 16). Las conclusiones más importantes que pueden deducirse del estudio de caracterización de vertidos son las siguientes:

- La agrupación de las dos poblaciones estudiadas recogían en el año 2005 las aguas residuales de un censo de 6.828 habitantes, de los cuales Los Corrales aportaban 4.081 habitantes y Martín de la Jara 2.747 habitantes.
- Las aguas residuales se evacuaban a través de cinco puntos de vertido (tres puntos en Los Corrales y dos en Martín de la Jara). El principal por su caudal es el J.1 de Martín de la Jara que recoge el 46,10% del volumen total, seguido a continuación por el C.2 de Los Corrales, que recoge el 31,78%, finalmente el 9,97 %, 7,74% y 4,41 % del volumen es recogido por los puntos J.2, C.1 y C.3 respectivamente.
- El volumen medio de agua vertida fue de 1.016,4 m³/día (11,764 L/s), para el año 2005, estos valores arrojaron una dotación de aguas negras “per cápita” media de 149 litros por habitante y día (L/c.d), cifra que se puede considerar normal para unas poblaciones de estas características; por poblaciones Los Corrales tiene una dotación de 109 litros/habitante y Martín de la Jara 207 litros/habitante. El volumen máximo de aguas residuales fue de 1.039,5 m³/día (12,03 L/s) para el año 2005.

- En cuanto a coeficientes punta sobre la media, se observa que el caudal es 1,8.

5.4.1.1. Coeficiente punta (C_p) de las aguas residuales: el coeficiente punta es la relación entre el consumo máximo horario, dentro del día de consumo máximo y el consumo horario medio dentro del día de consumo medio. Para este proyecto se vio razonable tomar como valor del coeficiente punta de la aguas residuales un $C_p = 2$. (Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 24)

5.4.1.2. Coeficiente de dilución: los puntos de vertido de las aguas residuales de los núcleos de población de Martín de la Jara y de Los Corrales se consideran “zonas no sensibles”, de acuerdo con los criterios de dilución de la Secretaría General de Aguas. Por tanto, la dilución que se ha considerado para este proyecto es de 3:1. Con este factor se obtendrá el caudal máximo de entrada a la depuradora. Además los aliviaderos se diseñaron para verter al efluente una dilución mínima de 3:1. (Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 24).

5.4.1.3. Caudal futuro de agua residual: el caudal de aguas negras estimado para el año horizonte 2.030 se obtuvo a partir de una dotación futura de 220 L/c.d y una población futura de 10.011 habitantes. Resultó por tanto, un caudal medio de 2.202,42 m³/día (25,5 L/s). De ese caudal: 843,48 m³/día (9,76 L/s) corresponden a Martín de la Jara y 1.358,94 m³/día (15,73 L/s) a Los Corrales.

A continuación se elaboró una tabla que resume los caudales de aguas residuales:

Tabla 5-1. Caudales de aguas residuales conjuntas de Martín de la Jara y Los Corrales.

Años		2005	2030
Caudal medio	m ³ /d	1.016,4	2.202,42
	L/s	11,764	25,5
Caudal máximo	m ³ /d	1.039,5	-
	L/s	12,03	-
Caudal punta	m ³ /d	2.032,8	4.404,84
	L/s	23,528	50,98

Los pre-diseños a realizar se calcularán con base en los caudales futuros.

5.4.2. Composición del Agua Residual

Se parte, también del estudio de Aforos y Analítica redactado por la empresa DBO5, en donde se describe la caracterización de los vertidos de las dos localidades (Martín de la Jara y Los Corrales). Este informe fue realizado con fecha de Abril de 2005 y se refleja en el proyecto elaborado por Castañon, et al. (2006), (TOMO I, p. 16). En él se aprecia que el agua residual posee la siguiente composición:

- Las concentraciones medias de los parámetros analizados respecto a los valores habituales en aguas residuales eminentemente urbanas son, normales, salvo para el Nitrógeno que son altas por el vertido que el matadero realiza en los canales.
- Por poblaciones el agua de Los Corrales tiene una concentración mayor: 512 mg/L de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y 473 mg/L de sólidos suspendidos (SS); mientras que Martín de la Jara presenta 288 mg/L de DBO y 465 mg/L de SS.
- La carga equivalente media de DBO₅ oscila entre 6.412 habitantes medios y 7.542 habitantes máximos, cifra media próxima a los 6.828 habitantes de la suma de los dos núcleos urbanos. Por poblaciones tanto en Los Corrales como en Martín de la Jara la carga equivalente se aproxima a la censada.
- En cuanto a coeficientes punta sobre la media, se observa que: el de la DBO es 2,9, el de la DQO es de 3,1 y el Nitrógeno Kjeldhal es de 1,8.
- Debe tenerse en cuenta la prohibición de vertidos del matadero de Los Corrales.

5.4.2.1. Carga contaminante del año 2005: para resumir los valores parámetros antes comentados en una tabla resumen, la fuente que se viene citando consideró el estudio de caracterización de vertidos realizado

en 1998 para el “Pliego de Bases Técnicas del Proyecto y Construcción de colectores y EDAR para Martín de la Jara, Los Corrales, Villanueva de San Juan, Algámitas y El Saucejo”. En ese estudio se obtuvieron 79,09 g(DBO₅)/hab/día y 69,93 g(SS)/hab/día para los núcleos de población de Martín de la Jara y Los Corrales. Dado que esos valores son superiores a los obtenidos en el estudio realizado por la empresa DBO5, decidieron adoptarlos para reflejar la carga contaminante del año 2005 (Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 25), lo que se muestra en la siguiente figura:

m3/día	1.016,4
Kg/día DBO ₅	540
Kg/día SS	477
Hab. equiv. (DBO ₅)	8.999
Habit. censados	6.828
gr. DBO ₅ /hab.día	79
gr. SS/hab.día	70

Figura 5-5. Carga contaminantes adoptada para el vertido conjunto del agua residual de Martín de la Jara y Los Corrales del año 2005. Fuente: Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 25.

Por su parte, las características del agua residual conjunta de las poblaciones de Martín de la Jara y Los Corrales para el año 2005 se muestran en la siguiente figura:

Características de las aguas residuales (2.005)		
DBO ₅	531	mg/l
DQO	973	mg/l
SS	469	mg/l
Nitrógeno Kjeldhal	49,5	mg/l
P total	9	mg/l

Figura 5-6. Composición del agua residual mezclada de Martín de la Jara y Los Corrales para el año 2005. Fuente: Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 25.

5.4.2.1. Carga contaminante futura: para el año 2030 será:

m ³ /día	2.203
Kg/día DBO ₅	792
Kg/día SS	700
Hab. equiv. (DBO ₅)	13.199
Habitantes	10.011
gr. DBO ₅ /hab.día	79
gr. SS/hab.día	70

Figura 5-7. Carga contaminantes adoptada para el vertido conjunto del agua residual de Martín de la Jara y Los Corrales del año 2030. Fuente: Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 26.

Por su parte, las características del agua residual conjunta de las poblaciones de Martín de la Jara y Los Corrales para el año 2030 se muestran en la siguiente figura:

Características de las aguas residuales (2.030)		
DBO ₅ entrada	360	mg/l
DQO entrada	658	mg/l
SS entrada	317	mg/l
Nitrógeno Kjeldhal entrada	33,5	mg/l
P total entrada	6,1	mg/l

Figura 5-8. Composición del agua residual mezclada de Martín de la Jara y Los Corrales para el año 2030. Fuente: Castañon, et al., 2006, TOMO I, p. 26.

La carga contaminante a considerar en los pre-diseños será la futura.

5.4.3. Límites Legales de Vertido y Porcentajes de Remoción

Los límites legales de vertido se presentan en la siguiente figura:

Tabla 5.1. Descargas de agua residual municipal en aguas superficiales y el subsuelo.

Población (hab-equiv .)	Descargas en aguas superficiales y el subsuelo								
	-	(medido en mg/L)							(NMP/ 100ml)
	pH	DBO ₅	DQO	SS	N-NH ₄	N-(NH ₄ +NO ₃)	P-PO ₄	Cl.Res.	C.T.
< 1,000	6 - 8.5	50	160	50	-	-	-	0.05	1000
1,001 - 5,000	6 - 8.5	50	160	50	-	-	-	0.05	1000
5,001 - 10,000	6 - 8.5	45	150	45	-	-	-	0.05	1000
10,001 - 100,000	6 - 8.5	35	130	40	10	18	3	0.05	1000
> 100,000	6 - 8.5	35	130	35	10	18	2	0.05	1000

Nota: La producción de DBO₅ de un habitante equivalente es aproximadamente 60 g/hab/d

Demanda biológica de oxígeno (DBO ₅)	Nitrógeno de amonio y nitratos N-(NH ₄ +NO ₃)
Demanda química de oxígeno (DQO)	Fósforo de los ortofosfatos (P-PO ₄)
Sólidos en suspensión (SS)	Cloro residual (Cl.Res.)
Nitrógeno del amonio (N-NH ₄)	Coliformes totales (C.T.)

Figura 5-9. Límites de Descarga de Aguas Residuales Municipales en Aguas Superficiales y el Subsuelo.

Fuente: Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales (s.f.), (p. 21).

Comparando la composición futura del agua residual con los límites de vertido, se tuvo en cuenta la población futura que en el año 2030 se estima que será de 10.011 habitantes, por lo que se emplean los límites de vertido para poblaciones entre 10.001 y 100.000 habitantes, con lo cual se establecen los porcentajes de remoción requeridos, lo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5-2. Porcentajes de Remoción de Contaminantes en las Aguas Residuales de las Comunidades de Interés

Parámetros (unidades)	Valores del agua residual cruda mezclada para las comunidades Martín de la Jara y Los Corrales	Límites de vertido de aguas residuales municipales en aguas superficiales (para poblaciones entre 10.001 y 100.000 habitantes)	Porcentajes de remoción requeridos
SS (mg/L)	317	40	87,38
DBO _{5,20} (mg/L)	360	35	90,28
DQO (mg/L)	658	130	80,24
NTK (mg/L)	33,5	18	46,27
P (mg/L)	6,1	3	50,82

Nota: %remoción = [(valor del agua cruda – limite de vertido)/valor del agua cruda]x100%

5.4.4. Prediseño Básico de la EDAR con Contactores Biológicos Rotativos (CBR) o Biodiscos

El tratamiento del agua residual mediante una EDAR convencional con tratamiento secundario basado en biodiscos, requiere de pretratamientos, y de un tratamiento primario, adicional a los biodiscos como tratamiento secundario, es vital la existencia de un sedimentador secundario, y con un tratamiento terciario de desinfección se suelen cumplir los límites de vertido si el agua tratada es municipal o urbana. Además, deben estar presentes los tratamientos de lodos. Una EDAR así consume materia y energía, y genera subproductos y/o desechos, como se aprecia en el siguiente esquema:

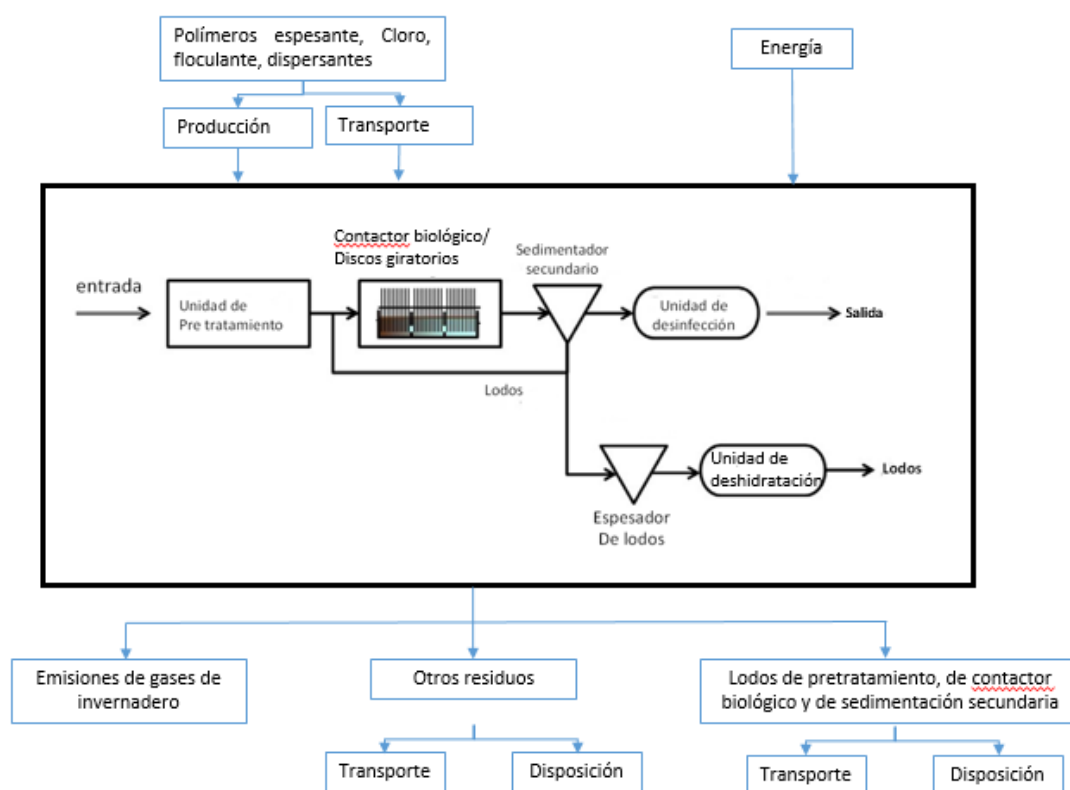


Figura5-10. Límites del sistema, procesos unitarios, salidas y entradas al sistema CBR (biodiscos). Fuente: Modificado de Garfi et al. 2017.

5.4.4.1. Generalidades de los Biodiscos

Los biodiscos son sistemas de tratamiento biológico secundario, para aguas residuales domésticas e industriales biodegradables. Son tratamientos biológicos del tipo de crecimiento adherido o reactor de película fija. Las lamass o películas biológicas crecen sobre los discos en rotación a través del agua residual, montados sobre un eje horizontal. En el proceso la película biológica se encuentra en rotación, por lo que en parte estará dentro del agua residual y el resto del tiempo en contacto con el aire atmosférico que provee oxígeno para los microorganismos. El agua residual fluye en sentido paralelo o perpendicular al eje horizontal de rotación, al pasar de una etapa a otra o de un tanque a otro. Para el año 1980 existían más de 3.000 plantas de biodiscos en todo el mundo. (Romero, 2008, p. 609)

Entre las ventajas de los biodiscos se encuentran las siguientes: simplicidad, alta eficiencia de remoción de carbono y nitrógeno, confiabilidad si se realiza el pretratamiento apropiado que generalmente es la sedimentación, resistencia a cargas de choque tóxicas, tiempos de retención cortos, poco consumo energético, bajos costos de operación y mantenimiento, lodos de buena sedimentabilidad, generalmente no se requiere realizar recirculación de efluentes ni lodos, y se puede desarrollar la construcción en forma modular. (Romero, 2008, p. 609)

Por otra parte, también hay que considerar las desventajas de este tipo de tecnología, tales como: fallas en los discos, los ejes y los motores; fugas de lubricantes, y criterios de diseño aún muy disímiles (Romero, 2008, p. 609). Además, debe tenerse en cuenta los principales factores que influyen en el proceso de tratamiento en los biodiscos, los cuales son: las características del agua residual, entre las que destaca su temperatura; la carga hidráulica y orgánica, la velocidad rotacional de los discos, la sumergencia, y el tiempo de retención (ob. Cit., p. 610).

5.4.4.2. Parámetros de Diseño, Operación y Mantenimiento de Biodiscos

5.4.4.2.1. Operación de Biodiscos

En cuanto a la operación, de acuerdo con Romero (2008), los sistemas de biodiscos tratan aguas residuales crudas y tratadas; sin embargo, se prefiere tratar efluentes primarios para prevenir depósitos de sedimentos en los reactores. A medida que el agua residual pasa a través del sistema de tratamiento, el sustrato es removido como resultado de la oxidación biológica. Por lo general no se usa recirculación, ya que la experiencia indica que no contribuye apreciablemente a mejorar la eficiencia del proceso. El exceso de biomasa se desprende de los discos de modo continuo, como resultado del esfuerzo cortante originado en la rotación en el agua y por la descomposición celular. (p. 614)

Para maximizar la remoción de DBO y nitrógeno amoniacal se recomienda diseñar unidades de biodiscos de más de cuatro etapas. Como una aproximación a la selección del número de etapas, se aconseja asegurar que la carga orgánica en cualquier etapa sea menor de 12 g de DBO soluble por cada m² de medio y por día, o menor de 31 g de DBO total/m².d. Sin embargo, las guías de diseño de los fabricantes varían ampliamente entre sí. (Romero, 2008, p. 614)

Los organismos de la primera etapa están expuestos a una concentración más alta de DBO y la reducen a una tasa alta. A medida que la concentración de DBO disminuye, de etapa a etapa, la tasa de remoción de DBO también lo hace. En plantas de biodiscos diseñadas para efectuar nitrificación, se debe mantener un control permanente del pH y de la alcalinidad, ya que en el primer caso, el valor debe estar lo más cercano a 8,4 y en el segundo caso, el efluente debe ser 7,1 veces la concentración de amoníaco. Si es necesario, en ese caso, se debe agregar bicarbonato de sodio para aumentar la alcalinidad y el pH. (Ob. Cit., p. 616)

5.4.4.2.2. Configuración de los Discos

El material para elaborar los discos, más usado desde el año 1972 es el polietileno de alta densidad, dado su costo más bajo, y además, porque ha permitido ensamblar ejes de 8,2 m de longitud con área superficial de 9.300 a 16.700 m², en diámetros de 3,7 m. El biodisco plástico común está hecho de hojas plásticas ensambladas a modo de cilindros de 3,6 m de diámetro, unidas y ensambladas sobre ejes de entre 7,5 y 8,2 m de longitud. El espaciamiento entre hojas provee el vacío para distribución del agua residual y del aire. (Ob. Cit., p. 614)

Sin embargo, cada fabricante aplica sus criterios propios de diseño, ejes, medios plásticos variados, tipos de motores y características específicas diferentes. Incluso emplean medios corrugados para incrementar la rigidez de los discos y para incrementar el área superficial disponible, prolongar el tiempo de exposición al aire para incrementar la oxigenación, y mantener un contacto uniforme de la biopelícula con el agua residual. (Ob. Cit., p. 614)

5.4.4.2.3. Configuración del Tanque

Los tanques son de concreto o acero, por lo general conformados a la geometría circular del medio para eliminar espacio muertos en los que podrían acumularse sólidos que causarían condiciones sépticas y olores. Los tanques se dividen comúnmente en cuatro etapas, mediante paredes de concreto o pantallas removibles, para permitir flujo de una etapa a otra y para que cada etapa actúe como un proceso separado de tratamiento, maximizando la efectividad del área superficial de medio provista. (Ob. Cit., p. 614)

5.4.4.2.4. Configuración del Impulsor

El mecanismo de impulso del eje de rotación puede ser mecánico o neumático. EL impulso mecánico cuenta con motor, cadena y correa impulsora, reductor de velocidad y cojinete. En el neumático se adhieren copas de plástico al exterior del medio, para que un pequeño cabezal de aire colocado debajo del medio, emita el aire dentro de las copas y cree una fuerza de empuje que haga rotar el eje. En ambos casos, el eje está soportado por dos cojinetes principales. (Ob. Cit., p. 616)

5.4.4.2.5. Microbiología del Proceso

El análisis microscópico de muestras de biopelículas de 10 contactores biológicos rotativos indicó la presencia de bacterias filamentosas, protozoos, nematodos, rotíferos y anélidos. El predominio de los diferentes organismos encontrados está relacionado con la carga orgánica y el oxígeno disuelto existente. En general, se

considera apropiado mantener una concentración mínima de 2 mg/L de oxígeno disuelto (OD) en los reactores, para un rendimiento adecuado. (Ob. Cit., p. 621)

5.4.4.2.6. Características Típicas de Biodiscos

En general, los parámetros de diseño de los biodiscos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5-3. Características Típicas de los Discos Biológicos

<i>Parámetros (unidades)</i>	<i>Valores y rangos</i>
Carga hidráulica (m/d)	0,04 – 0,06 0,02 – 0,08 0,06 – 0,10
Carga hidráulica (m/d) para remoción de DBO	0,06 – 0,24
Carga hidráulica (m/d) para remoción de DBO/SS < 30/30 mg/L	0,08 – 0,16
Carga hidráulica (m/d) para remoción de N	0,06 – 0,07
Carga hidráulica (m/d) para remoción de DBO/SS < 15/15 mg/L y nitrificación	0,03 – 0,08
Carga orgánica (g de DBO/m ² .d) sobre la primera etapa	50 – 60 < 100 < 31
Carga orgánica (g de DBO/m ² .d) para DBO soluble	12 – 20
Carga orgánica (g de DBO/m ² .d) para DBO total	30 – 40
Tiempo de retención (minutos)	50 – 70
Coeficiente de temperatura	1,02 – 1,04
Velocidad de rotación del eje (RPM)	1 – 2
Longitud del eje (m)	7,5
Diámetro del eje (mm)	13 – 25
Motores del eje (kW/eje)	3,7 – 5,6
Numero de discos por eje	40 – 60
Numero de etapas en serie	4 – 5
Diámetro del disco (m)	3,0 – 3,6 2 – 3
Espesor del disco (mm)	10
Material plano o corrugado	Poliestireno o polietileno
Sumergencia (%)	40
Velocidad de rotación periférica (cm/s)	20 - 30
Separación de los discos (cm)	3 – 4
Área de discos por eje (m ²)	9.300 – 11.700
Carga de sólidos para caudal pico del sedimentador secundario (kg/m ² .d)	147 – 176
Tiempo de retención del sedimentador secundario (h)	4
Carga superficial del sedimentador secundario (m/d)	33
DBO total del efluente (mg/L)	15 – 30
DBO soluble del efluente (mg/L)	7 - 15
Producción de lodos (kg de lodos/kg de DBO removida)	0,04 – 0,5
Concentración de sólidos en los lodos (%)	2 – 5
Eficiencia de remoción de DBO (%)	80 – 95
Consumo de energía (W/m ²)	0,6
Costo (US\$/m ²)	3,2 – 5,4

Fuente: editado de la Tabla 21.1, Romero (2008), (p. 620).

5.4.4.3. Imágenes de Biodiscos

Se muestran a continuación:



Figura 5-11. Biodisco Sencillo y sus Principales Partes. Fuente: editado de <https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-ix-i-tratamiento-imhoff-biodiscos>.

El biodisco antes esquematizado es de discos lisos y de una sola etapa con tanque metálico.



Figura 5-12. Instalación de un Biodisco en Campo. Fuente: <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/biodiscos-la-solucion-perfecta-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-pequenas-pobl-amVHc>.

El biodisco antes mostrado es de varias etapas (al menos dos, pues se aprecian dos zanjias construidas) con tanques de concreto y material del cisco corrugado.



Figura 5-13. Instalación Avanzada de un Biodisco de Dos Etapas en Campo. Fuente: <https://hidrometalica.com/biodiscos/>.

En esta imagen se apreció la instalación avanzada de un biodisco de doble etapa en campo, en zanjas de concreto, con material del disco corrugado y ya uno de los biodiscos posee su techo (el otro, aún no).



Figura 5-14. Biodiscos Instalados en Campo de Varias Etapas. Fuente: <https://www.iagua.es/blogs/jorge-chamorro/depuracion-principiantes-xi-imhoff-biodiscos-ejemplo>.

Finalmente, se muestra la imagen anterior, que puede ser un tratamiento de biodiscos de seis etapas en serie o incluso, uno de tres etapas en serie estando cada una de las etapas en serie a su vez en paralelo entre sí. Como se aprecia, es una configuración compleja, con zanjas en concreto.

5.4.4.4. Posible Selección de la EDAR Centrada en Biodiscos

Una planta de tratamiento típica basada en biodiscos se presenta en la siguiente figura:

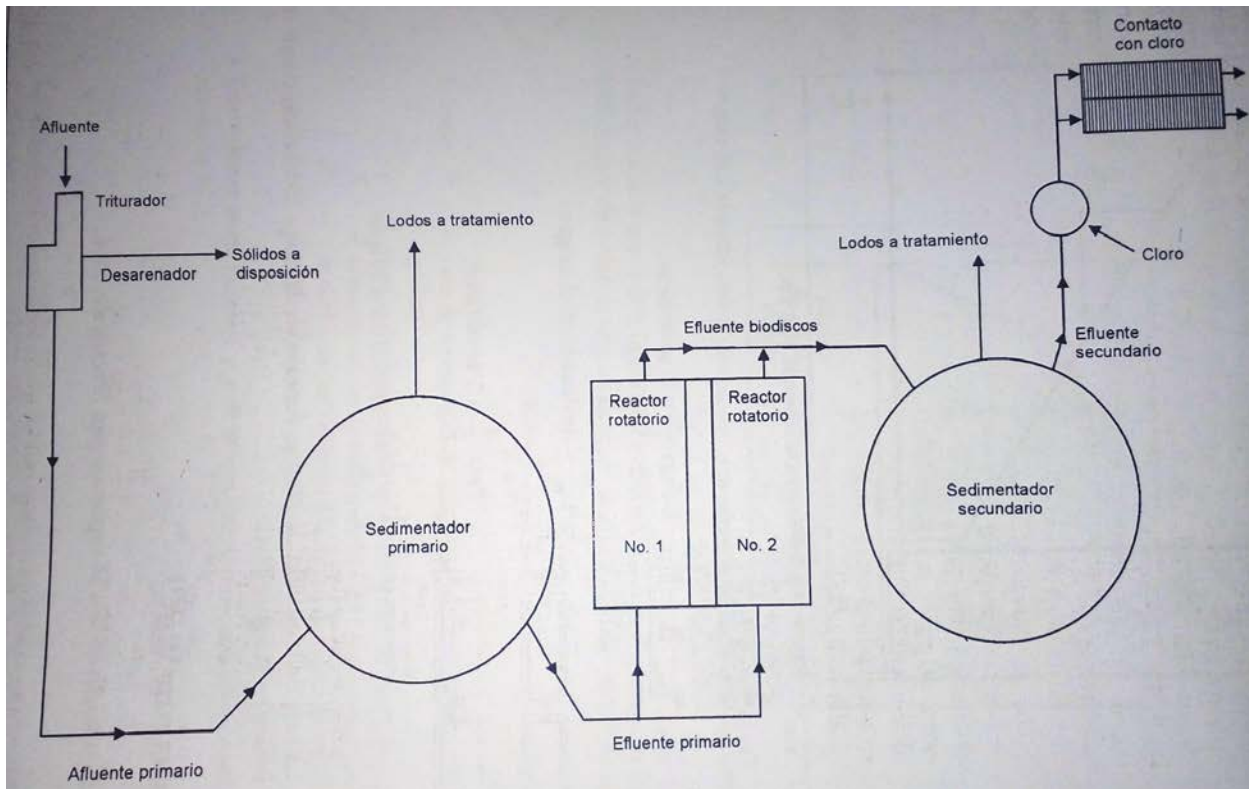


Figura 5-15. Planta de Tratamiento con Biodiscos. Fuente: Figura 21.5 (Romero, 2008, p. 615).

Como se aprecia en la figura anterior, una EDAR de biodiscos convencional puede estar compuesta por: pretratamiento compuesto por triturador y desarenador, un tratamiento primario de sedimentación, un tratamiento secundario compuesto al menos por dos biodiscos en paralelo seguidos de un sedimentador secundario, y un tratamiento terciario de desinfección con cloro. Además, se deben realizar tratamientos del lodo que no se especifican.

Por otra parte, ya se ha mencionado que en Castañón, et al. (2006), (TOMO I, p. 423) se diseñó la red cloacal que une los vertidos de ambas poblaciones, la cual proponen que descargue a una EDAR convencional con las siguientes unidades de depuración: 1) desbaste de gruesos, 2) tamizado, 3) desarenado, 4) desengrasado, 5) medidor de caudal, 6) decantación primaria, 7) tratamiento biológico (para el cual consideraron tres opciones: 7.1) fangos activos de media carga, 7.2) fangos activos de aireación prolongada, y 7.3) canales de oxidación, los tres son procesos análogos a lodos activos), 8) decantación secundaria, y 9) tratamiento de fangos: 9.1) espesado y 9.2) deshidratación por centrifugación.

Uniando ambas opciones, o buscando un punto medio y lógico entre lo que propone la literatura especializada y lo que originalmente consideraron en el proyecto de vertido conjunto de Martín de la Jara y Los Corrales, sumado al criterio del investigador, se propone el siguiente tran de tratamiento para la EDAR de biodiscos:

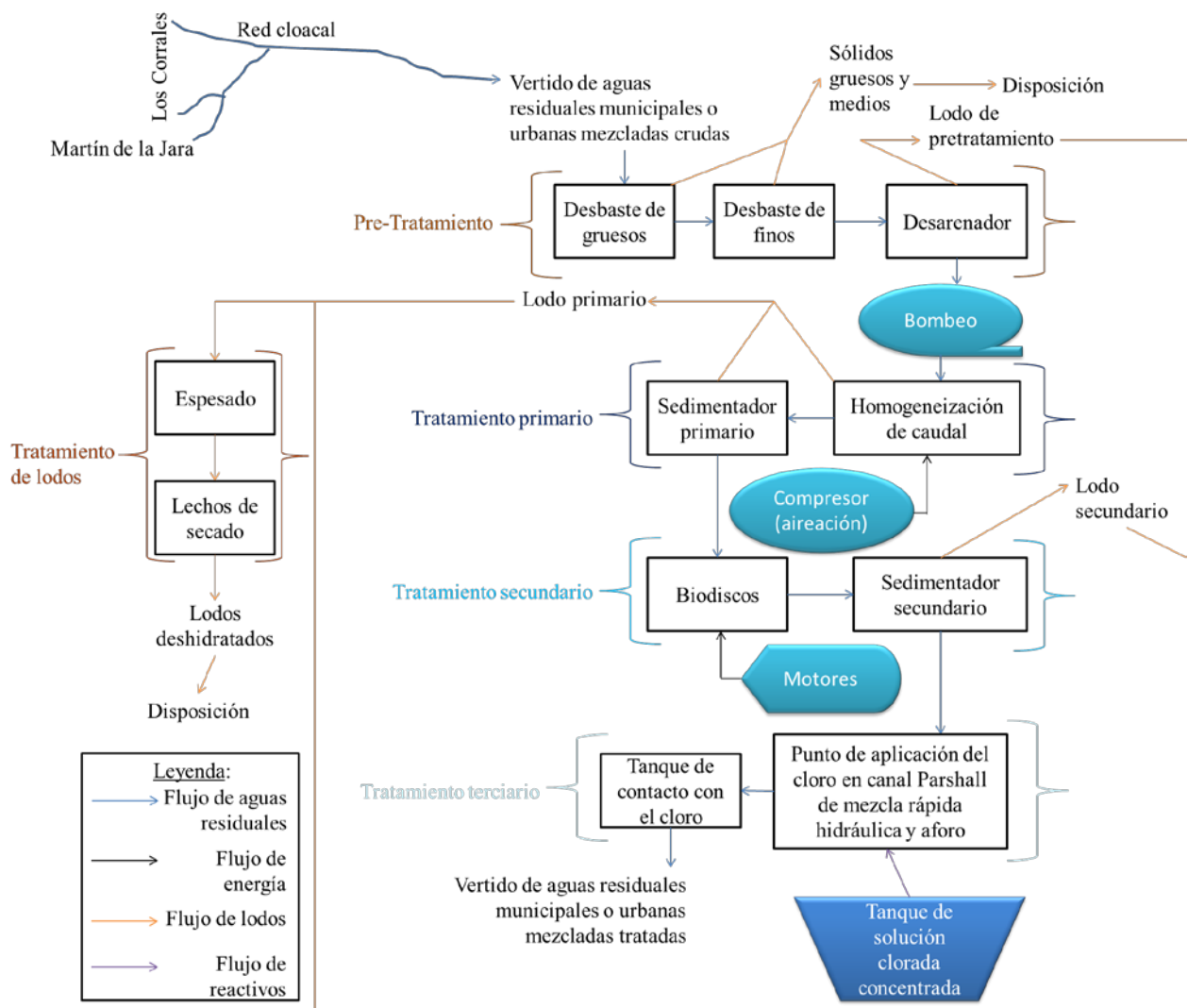


Figura 5-16. Diagrama de flujo EDAR de Biodiscos Propuesta.

Como se aprecia en esta figura, se eligió que la EDAR de biodiscos posea como pretratamiento un desbaste de sólidos gruesos en serie con un desbaste de sólidos finos, este tratamiento permite la remoción de sólidos que deben ser adecuadamente dispuestos. A continuación se hará la remoción de arenas o sólidos sedimentables en un desarenador, que genera lodo del pretratamiento. El tratamiento primario incluye la homogeneización de caudal, como proceso que permite regular las cargas de choque hidráulicas y orgánicas sobre el resto de unidades de tratamiento, por lo que garantiza un caudal medio constante (que permite que el resto de las unidades de tratamiento sean más pequeñas, y por ende, economizar en terreno y materiales de construcción de la EDAR) y una DBO poco fluctuante (que favorece el tratamiento biológico), para esta homogeneización en particular se recomienda la mezcla neumática para oxigenar el agua, remover gases disueltos y olores, aportar oxígeno para favorecer a los microorganismos aerobios, lo que puede contribuir con la reducción de la DBO, y el ascenso de burbujas hará flotar espumas y grasas, por lo que se recomienda incorporar en la superficie de este tratamiento un removedor de sólidos flotantes, que constituyen en parte, los lodos primarios, en este caso, flotantes. El tratamiento primario también incluye un sedimentador, que remueve sólidos aún más pequeños que los que remueve el desarenador, generando también lodo primario, aunque en este caso, decantado. El tratamiento biológico incluye los biodiscos, como sistemas que permiten la proliferación de biopelículas (comunidad de microorganismos protegidos por un exopolisacárido que ellos mismos excretan) adheridas a los discos, que consumen la materia orgánica biodegradable del agua residual [que típicamente se contabiliza como DBO

(aunque la DQO en parte contiene a la DBO)] o DBO soluble, y la utilizan como alimento para producir nuevas biopelículas (DBO insoluble) que se van desprendiendo de los discos gracias a sus giros y son arrastradas por el flujo de agua, formando floc biológico (biopelículas desprendidas residuales) que debe ser removido mediante decantación en el sedimentador secundario, lo que genera el lodo secundario.

Finalmente, se emplea la cloración como tratamiento de desinfección del agua residual tratada, la cual luego de esto, podría ser descargada directamente al cuerpo de agua receptor, o en su defecto, dependiendo de la calidad que alcance luego del tratamiento, ser reutilizada por ejemplo en riego. El lodo del pretratamiento, el lodo primario y el lodo secundario se combinan y serán sometidos a un tratamiento de espesamiento mediante un decantador de lodos, luego de lo cual se genera agua clarificada que se recircula a la línea de tratamiento del agua residual de la EDAR, y lodo espesado que se vierte sobre lechos de secado de arena, que actúan como filtros lentos de arena y permiten que percole el exceso de líquido hacia el fondo, el cual puede ser recirculado a la línea principal del flujo del agua residual, y sobre la arena queda el lodo deshidratado que debe ser dispuesto apropiadamente.

5.4.4.5. Prediseño del Biodisco

Para prediseñar el tratamiento de biodiscos se siguen los ejemplos de diseño de la literatura especializada, tales como el “21.6 Ejemplo de Planta de Biodiscos” (Romero, 2008, p. 622 - 626), también se revisó el “Ejemplo 10-8. Diseño de un proceso de RBCs” (METCALF & EDDY, INC., 1995, p. 722 - 723), sin embargo, este último se considero muy corto y poco útil para el presente caso. Sin embargo, este texto muestra, entre otras, dos alternativas de diseño de los contactores biológicos rotativos (RBCs, por sus siglas en inglés) o simplemente biodiscos, que se muestran en la siguiente figura:

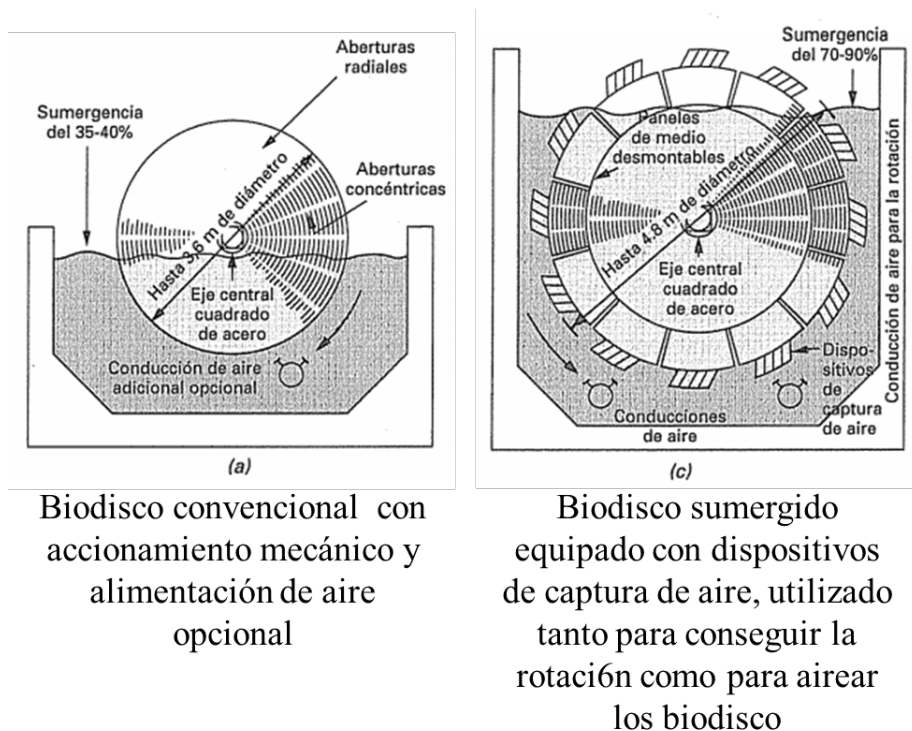


Figura 5-17. Biodiscos de accionamiento o giro: (a) mecánico y (c) neumático. Fuente: METCALF & EDDY, INC., 1995, p. 721.

De estas dos opciones, se escoge el accionamiento mecánico. Hay que tener presente además el tipo de configuración del tratamiento, las opciones posibles se esquematizaron en la siguiente figura:

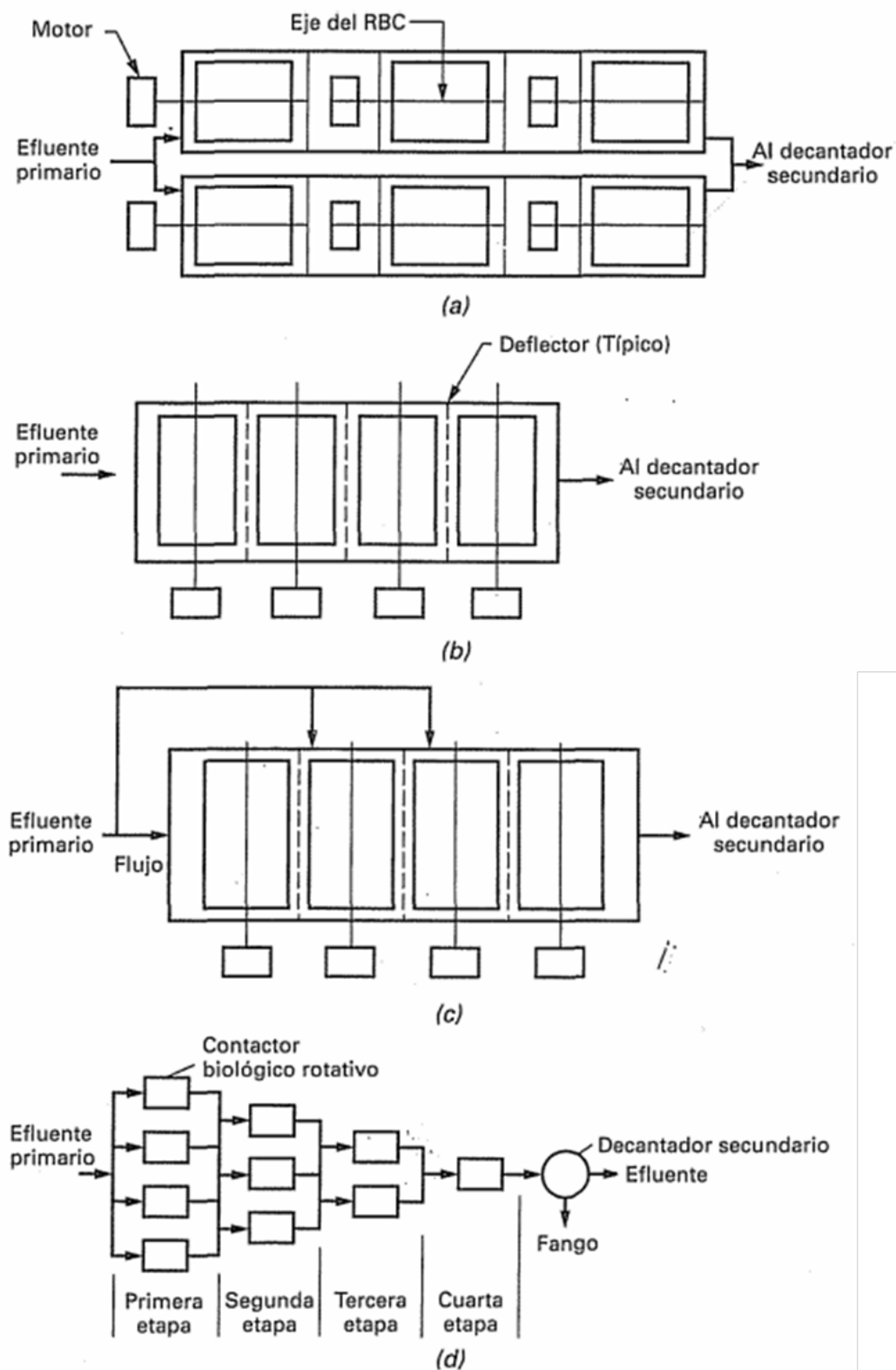


FIGURA 10-38

Configuraciones típicas de los sistemas de RBCs: (a) flujo paralelo al eje; (b) flujo perpendicular al eje; (c) alimentación escalonada, y (d) alimentación graduada.

Figura 5-18. Configuraciones típicas de sistemas de biodiscos. Fuente: METCALF & EDDY, INC., 1995, p. 717.

De estas configuraciones, se escoge la de flujo perpendicular al eje (b) con alimentación escalonada (c), pues se consideran las opciones más sencillas y económicas de operar este sistema.

Para iniciar los cálculos como tal del biodisco se debe conocer la DBO con la que ingresará el agua residual a este sistema, por lo que se debe tener presente que antes de los biodiscos, como se aprecia en la figura 5-16, habrá, primeramente el desbaste (de gruesos y finos), el desarenador, la homogeneización y el sedimentador primario. Consultando la bibliografía especializada, sobre los porcentajes de remoción de DBO de cada uno de esos procesos unitarios, lo que se tomo del texto de Romero (2008, p. 141), se realiza un balance de remoción de DBO que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5-4. Balance de remoción de DBO en la EDAR de biodiscos, desde el agua residual cruda hasta los biodiscos.

DBO entrante (mg/L)	Unidad de tratamiento	% de remoción de DBO	DBO saliente (mg/L)**
360*	Desbaste de sólidos gruesos y finos	Para cribado fino, entre 5 y 10 %. Se selecciona 10% (dado que además de la remoción de finos, también habrá remoción de gruesos)	324
324	Desarenador	Entre 0 y 5 %. Se selecciona 3% (un valor cercano al promedio)	314,28
314,28	Homogeneización de caudal y carga	0% (la literatura no reporta un % de remoción, a pesar que la aireación podría remover parte de la DBO)	314,28
314,28	Sedimentación primaria	Entre 30 y 40 %. Se selecciona 35% (un valor promedio)	204,282
204,282	Biodiscos + sedimentación secundaria	Entre 80 y 85 %. Para que el efluente tenga 35 mg/L de DBO, se requiere un porcentaje de remoción de 82,87%, que está entre el rango dado por la literatura especializada, por lo que se considera factible que la EDAR de biodiscos satisfaga el nivel de tratamiento requerido.	≤ 35 (límite de vertido legalmente aceptado)

Notas: *(valor tomado de la figura 5-8, para un escenario futuro para el año 2030),
saliente = $(\text{DBO entrante}) \times \{1 - (\% \text{remoción} / 100\%)\}$.

**[DBO

Se toma una DBO de 204,282 mg/L de acuerdo con la tabla anterior, para iniciar los cálculos del sistema de biodiscos. Es útil también el dato de DBO soluble (DBOS), el cálculo de la DBOS se tomó del proyecto “BIODISCOS Algamitas – 1500 hab-eq” (que se puede descargar en: <https://wetransfer.com/downloads/ee65dd90ea3c153bd9c90dd9db79dd9920201119190128/8bf835>), específicamente de su “ANEJO N° 10.- DIMENSIONAMIENTO DEL PROCESO” (p. 5) donde se muestra que la DBOS se puede estimar según los datos que se recogen en el “Aurelio Hernández Muñoz - Depuración de Aguas Residuales, p. 558” que dice que la DBOS = 35-40 % de la DBO para aguas urbanas no decantadas, y la DBOS = 50-55 % de la DBO para aguas urbanas decantadas; en el presente caso, previo a los biodiscos habrá sedimentación primaria, por lo que se consideran aguas urbanas decantadas, así que se toma un porcentaje entre 50 y 55 %, de 53% y la DBOS es: $\text{DBOS} = (53\%) \times (204,282 \text{ mg/L}) = 108,27 \text{ mg/L}$. Otro dato relevante es el caudal, que para el año 2030 se espera que muestre un valor medio de: $Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$ (se toma el caudal medio ya que al ingresar el agua al sistema de biodiscos ya ha pasado por el tratamiento de homogeneización que genera este caudal de manera constante).

Entre los parámetros específicos seleccionados para el pre-diseño se tienen:

- Material de los discos: polietileno de alta densidad (PEAD)
- Carga hidráulica (CH) para remoción de DBO: entre 0,06 – 0,24 m/d, se selecciona el valor de 0,183535 m/d
- Área de plástico para los discos (As): entre 9.300 – 16.700 m². Como la carga hidráulica (CH) es: $\text{CH} = Q/\text{As}$, y la $\text{CH} = 0,183535 \text{ m/d}$, $Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$, se despeja As: $\text{As} = 12.000 \text{ m}^2$, valor dentro del rango recomendado.

- Carga orgánica (C.org) para DBOS: entre 12 – 20 g/m².d. Puesto que: C.org = (Q.DBOS)/As = [(2.202,42 m³/d)x(108,27 g/m³)]/12.000 m² = 19,87 g/m².d. El valor está dentro del rango, por lo que se aprueba el diseño
- Tiempo de retención (TRH) = 50 a 70 min
- Velocidad de rotación = 2 RPM
- Longitud del disco (L) = 7,5 m
- Diámetro del disco (D) = 3 m
- Discos por eje: entre 40 y 60
- N° de etapas: entre 2 y 5
- Sumergencia: 40%

Como los discos son cilindros, y el área de un cilindro [A(cilindro)] es: $A(\text{cilindro}) = \Pi.D.L$, donde: $\Pi = \pi$ (3,14159...), D = 3 m, L = 7,5 m. Sustituyendo: $A(\text{cilindro}) = 70,69 \text{ m}^2$. El área de un cilindro dividida entre el área total (As) permite calcular el número de capas o discos por eje a emplear, así: $(12.000 \text{ m}^2)/(70,69 \text{ m}^2) = 169,76$, así que se usarán 170 discos o capas. Como por cada eje deben haber entre 40 y 60 discos, se seleccionan cuatro etapas de biodiscos en serie, cada una con $(170/4)$ 43 discos por eje, valor que está entre 40 y 60, por lo que se acepta el diseño.

En cuanto a las dimensiones del tanque, este deberá tener la capacidad de albergar cuatro discos en serie, cada uno de 3 m de diámetro, por lo que el largo total del tanque será $> (3 \text{ m}) \times 4 = 12 \text{ m}$, así que se toman 15 m, para que existan 60 cm de separación entre cada disco, y entre estos y los muros. Por su parte, el ancho del tanque será mayor a la longitud de cada disco (7,5 m) por lo que se toman 8 m, esto se aprecia en la siguiente figura:

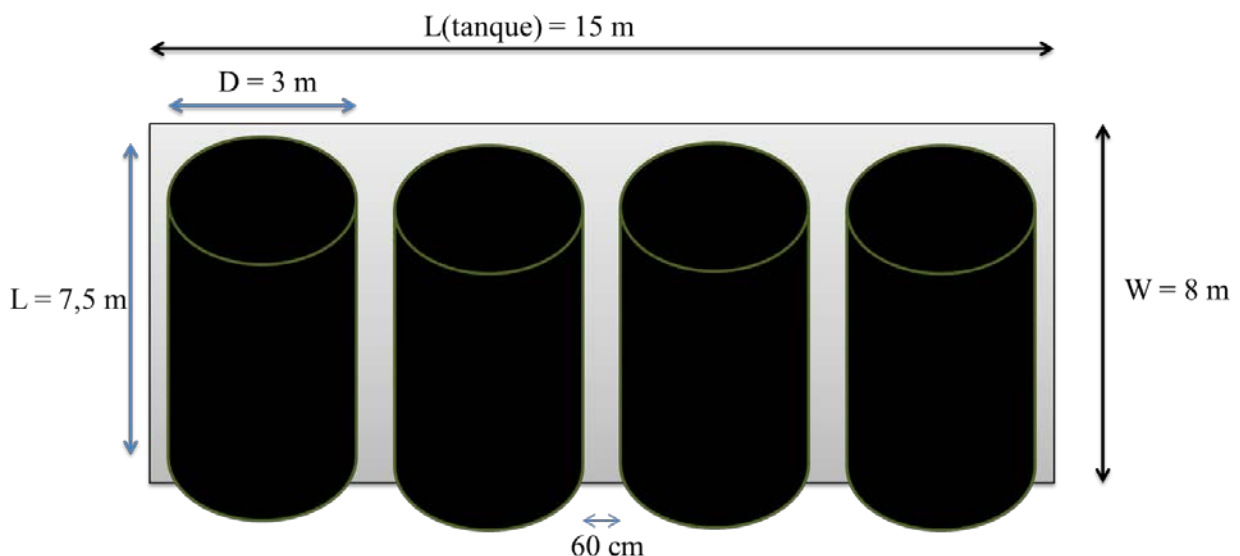


Figura 5-19. Diseño de la Vista de Planta del Tanque que Contendrá los Biodiscos.

Ahora realizando el diseño de la vista lateral del tanque que contendrá los biodiscos, la misma se aprecia en la siguiente figura:

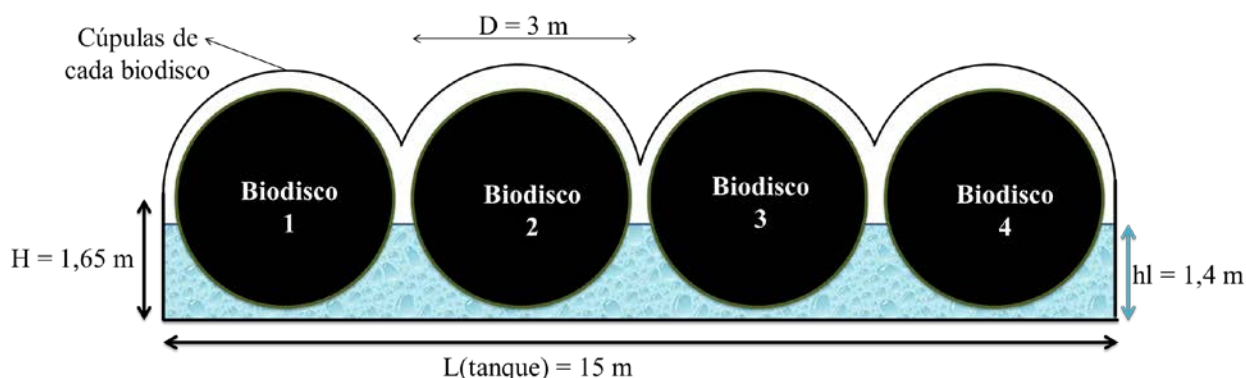


Figura 5-20. Diseño de la Vista Lateral del Tanque que Contendrá los Biodiscos.

Puesto que la sumergencia es del 40%, eso quiere decir que de la altura total de un disco ($D = 3 \text{ m}$) el 40% de ella debe estar bajo el agua: $(3 \text{ m}) \times (40\%) = 1,2 \text{ m}$, así que se le dio un valor de $1,4 \text{ m}$ a la altura de agua (h_l), para que debajo de cada disco haya una altura libre de 20 cm de agua que permita el rodaje efectivo de cada cilindro de tratamiento. El borde libre de un tanque de tratamiento suele estar entre 20 y 30 cm , tomando un valor de 25 cm , sumados a h_l , la altura total del tanque (H) es de $1,65 \text{ m}$. Como se observó en las imágenes de diferentes biodiscos, se suele colocar una cúpula o techo sobre cada uno.

Ya se puede determinar el tiempo de retención (TRH) pues se tiene Q ($2.202,42 \text{ m}^3/\text{d} = 1,53 \text{ m}^3/\text{min}$) y se puede determinar el volumen de agua neto (V_{neto}), preliminarmente, así: $V_{\text{neto}} = L(\text{tanque}) \cdot W \cdot h_l = (15 \times 8 \times 1,4) \text{ m}^3 = 168 \text{ m}^3$ (se toma toda la altura de líquido dado que los discos permiten que el agua penetre a través de ellos). Entonces, el TRH es:

$$\text{TRH} = \frac{V_{\text{neto}}}{Q} = \frac{168 \text{ m}^3}{1,53 \text{ m}^3/\text{min}} = 109,843 \text{ min}$$

El TRH es un poco mayor a 70 min , lo que puede ser beneficioso para el tratamiento del agua, ya que la misma tiene más tiempo de depurarse dentro de la unidad. Finalmente se selecciona un motor comercial de $5,5 \text{ HP}$ por cada eje, y puesto que habrá cuatro ejes o cuatro biodiscos en serie, la potencia total que consume el tratamiento, solo para el giro de los biodiscos, es de 22 HP ($22 \text{ HP} = 16,4054 \text{ kJ/s} = 1,42 \text{ GJ/d}$). Un motor de $5,5 \text{ HP}$ equivale $4,11 \text{ kW}$, lo que cumple con los criterios de diseño, dado que allí se establece que cada motor de un eje tendrá una potencia que oscile entre $3,7$ y $5,6 \text{ kW}$, por lo que se acepta el diseño.

El resumen del diseño de los biodiscos se aprecia a continuación:

Tabla 5-5. Resumen del Prediseño de los Biodiscos de la Comunidad de Los Corrales

Parámetro	Valores recomendados	Valores definitivos	Observaciones
Caudal de diseño	-	$2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$	Q medio para el 2030, dado que se incluyó homogeneización
DBO de entrada	-	Total: $204,3 \text{ mg/L}$	Calculada con base en la remoción de cada unidad preliminar a los biodiscos
		Soluble: $108,3 \text{ mg/L}$	Se calculo como el 53% de la DBO total
Material de los discos	Plásticos variados	PEAD	El más común
Carga hidráulica (m/d)	$0,06 - 0,24$	$0,183535$	Dentro del rango deseado
Área total de láminas de PEAD para los discos (m^2)	$9.300 - 16.700$	12.000	Dentro del rango deseado

Carga orgánica (g/m ² .d)	12 – 20	19,87	Dentro del rango deseado
TRH (min)	50 – 70	109,843	Por arriba del rango, lo que puede ser beneficio pues el agua tendrá más tiempo para depurarse
L(disco), m	7,5 – 8,2	7,5	Dentro del rango deseado
D(disco), m	2 – 3,6	3	Dentro del rango deseado
Área de cada capa (m ²)	-	70,69	-
Capas totales de PEAD para discos	-	170	-
Nº de etapas	2 a 5	4	Dentro del rango deseado
Capas por eje	40 – 60	43	Dentro del rango deseado
Sumergencia	40%	1,2 m	Se cumple dado que la altura del líquido es de 1,4 m, con un espacio inferior libre de 0,2 m
L(tanque), m	-	15	-
W(tanque), m	-	8	-
H(tanque), m	-	1,65	-
Motor por eje (kW)	3,7 – 5,6	4,11	Motor comercial de 5,5 HP
Potencia instalada total para giro de discos (HP)	-	22	-

5.4.4.6. Balances de Remoción de Contaminantes en las EDAR de Biodiscos

Se presenta en la siguiente tabla, tomando los porcentajes de remoción de la tabla 5.2 (Romero, 2008, p. 141):

Tabla 5-6. Balance de Remoción de Contaminantes en la EDAR de Biodiscos.

<i>Parámetros (unidades)</i>	<i>Valores en el agua residual cruda</i>	<i>Desbaste de sólidos gruesos y finos</i>		<i>Desarenador</i>		<i>Sedimentador primario</i>		<i>Biodiscos + sedimentador 2º)</i>		<i>Cumplimiento con los valores de vertido legalmente establecidos</i>	
		<i>% de remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>% de remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>% de remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>% de remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>Valores de vertido permitidos</i>	<i>¿Cumple?</i>
SS (mg/L)	317	(2-20): 20	253,6	(0-10): 5	240,9	(50-65): 60	96,4	(80-85): 83	16,4	40	Si
DBO _{5,20} (mg/L)	360	(5-10): 10	324	(0-5): 3	314,3	(30-40): 35	204,3	(80-85): 83	34,7	35	Si
DQO (mg/L)	658	(5-10): 10	592,2	(0-5): 3	574,4	(30-40): 35	373,4	(80-85): 83	63,5	130	Si
N (mg/L)	33,5	-	33,5	-	33,5	(10-20): 15	28,5	(15-50): 40	17,1	18	Si
P (mg/L)	6,1	-	6,1	-	6,1	(10-20): 20	4,88	(10-25): 25	3,66	3	No

Notas: No se incluyeron en esta tabla las unidades de homogeneización y cloración, dado que no se reportan porcentajes de remoción de los parámetros considerados en esas unidades de tratamiento.

Se aprecia que las EDAR centradas en biodiscos son eficientes para la remoción de contaminantes y para la producción de un vertido legalmente permitido. El fosforo apenas sobrepasa el limite permitido, el resto de parámetros cumple con el valor de vertido deseado.

5.4.4.7. Costos de las EDAR de Biodiscos

5.4.4.7.1. Costos de la Adquisición del Terreno para la EDAR

En el siguiente cuadro se realizan una serie de cálculos muy básicos que permiten estimar el área total de la EDAR de biodiscos, tomando información de la bibliografía especializada y, considerando que las unidades preliminares a la homogeneización y ella misma, se diseñan a partir del caudal punta ($4.404,84 \text{ m}^3/\text{d} = 51 \text{ L/s} = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que las unidades ubicadas después de la homogeneización, incluyendo los tratamientos de lodos, se diseñan a partir del caudal homogeneizado o medio ($2.202,42 \text{ m}^3/\text{d} = 25,5 \text{ L/s} = 0,0255 \text{ m}^3/\text{s}$):

Tabla 5-7. Estimación del Área de EDAR de Biodiscos.

Unidades	Calculo del área de plantas	Datos	Resultado
Desbaste de gruesos y finos	$A_{secc} = Q/v$	$Q = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}$ $v = 0,6 \text{ m/s}$ (Romero, 2008, p. 288)	$A = 0,085 \text{ m}^2$
	$A = hl.W$	$hl = W$ (juicio del proyectista)	$W = 0,292 \text{ m}$
	$L(\text{rejas}) = hl/\text{sen}(\theta)$	$\theta = 60^\circ$ (Romero, 2008, p. 288)	$L(\text{rejas}) = 0,34 \text{ m}$
	$\frac{\text{Cos}(\theta)}{L(\text{horizontal})/L(\text{rejas})} =$	$\theta = 60^\circ$ (Romero, 2008, p. 288)	$L(\text{horizontal}) = 0,17 \text{ m}$
	$L(\text{canal}) = L(\text{horizontal}) \times 5$	A juicio del proyectista (suponiendo 2 rejas en serie, con los espaciados correspondientes)	$L(\text{canal}) = 0,842 \text{ m}$
	$A(\text{planta}) = W \times L(\text{canal})$	-	$A(\text{planta}) = 0,25 \text{ m}^2$
Desarenador	25 m de largo y 1,8 m de ancho (área de planta de 45 m^2) para un $Q_{\text{máx}} = 1,32 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{máx}} = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}$	$A(\text{planta}) = 1,74 \text{ m}^2$
Homogeneizador	$V_{\text{neto}} = Q.TRH$ $A_{\text{neto}}(\text{planta}) = V_{\text{neto}}/hl$	TRH: 12 – 24 h = 24 h. $H = 4,5 \text{ m}$. Borde libre (BL) = 0,9 m. (Romero, 2008, p. 316) $hl = H - BL = 3,6 \text{ m}$ $Q = 4.404,84 \text{ m}^3/\text{d}$	$V_{\text{neto}} = 4.404,84 \text{ m}^3$ $A_{\text{neto}}(\text{planta}) = 1.223,57 \text{ m}^2$
Sedimentador 1rio	$A(\text{planta}) = Q/CS$	$Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$ $CS = \text{Carga superficial (a } Q_{\text{prom}}) \text{ de } 32 \text{ a } 49 \text{ m}^3/\text{d: } 40 \text{ m}^3/\text{d}$ (Romero, 2008, p. 639)	$A(\text{planta}) = 55,06 \text{ m}^2$
Biodiscos	$A(\text{planta}) = W \times L(\text{tanque})$	$W = 8 \text{ m}$ $L(\text{tanque}) = 15 \text{ m}$	$A(\text{planta}) = 120 \text{ m}^2$
Sedimentador 2rio	$A(\text{planta}) = Q/CS$	$Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$ $CS = \text{Carga superficial (a } Q_{\text{prom}}) \text{ de } 16 \text{ a } 29 \text{ o de } 8 \text{ a } 33 \text{ m}^3/\text{d: } 22 \text{ m}^3/\text{d}$ (Romero, 2008, p. 644)	$A(\text{planta}) = 100,11 \text{ m}^2$
Cloración	$V_{\text{neto}} = Q \times TRH$	$Q = 0,0255 \text{ m}^3/\text{s}$ TRH: el tiempo de contacto puede variar entre 15 y 45 minutos (METCALF & EDDY, 1995, p. 571): se toman 30 min = 1.800 s	$V_{\text{neto}} = 45,9 \text{ m}^3$
	$A_{\text{neto}}(\text{planta}) = V/H$	$H = 1 \text{ m}$ (asumido por el proyectista)	$A_{\text{neto}}(\text{planta}) = 45,9 \text{ m}^2$
Espesador de lodos	$V_{\text{neto}} = Q.TRH$ $A_{\text{neto}}(\text{planta}) = V_{\text{neto}}/hl$ $D = \sqrt{4 \cdot A/\pi}$	$Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$ $H: 2 - 5 \text{ m}$. Forma de planta circular con $D: 3 - 30 \text{ m}$. TRH: 1 – 2 d. (Romero, 2008, p. 783) Se seleccionan: TRH = 1,5 d, $hl = 4,67 \text{ m}$, $D = 30$	$V_{\text{neto}} = 3.303,63 \text{ m}^3$ $A_{\text{neto}}(\text{planta}) = 706,86 \text{ m}^2$

Lechos de secado de lodos	$A(\text{planta}) = (A/c) \cdot c$	Para lodo primario y secundario se puede adoptar el valor de: $A/c = 0,2 \text{ m}^2/\text{hab}$ (Romero, 2008, p. 833) Población conjunta esperada para Martín de la Jara y Los Corrales en 2030 = 10.011 hab = c	$A(\text{planta}) = 2.002,2 \text{ m}^2$
$A(\text{planta}) \text{ total}$			$\Sigma A(\text{planta}) = 4.255,7 \text{ m}^2$

Como se aprecia, el área antes calculada es neta, pero si se suman espaciados entre unidades de tratamiento y construcciones adicionales (oficinas, baños, estacionamiento, etc.), siendo conservador, se puede adoptar un área total de la EDAR de biodiscos de 5.000,00 m². El costo promedio del terreno en Sevilla, España es de: 333,93 Euros/m², de acuerdo con la consulta y promedio de los 16 primeros datos apreciados en la página web <https://www.idealista.com/venta-terrenos/sevilla-provincia/> (accedido: 15 de noviembre de 2020), donde se calculó cada tasa dividiendo el costo total de cada terreno (en su mayoría parcelas y solares urbanos) en Euros entre su área en m², y se observaron valores que oscilaron entre 26,65 y 1.308,14 Euros/m², con cuatro valores menores a 100 Euros/m², y dos valores superiores a 1.000 Euros/m², lo que depende de la zona donde se ubica el terreno y las mejoras en el mismo. Aplicando el costo promedio:

$$\text{Costo del terreno} = (5.000,00 \text{ m}^2) \times \left(\frac{333,93 \text{ Euros}}{\text{m}^2} \right) = 1.669.650,00 \text{ Euros}$$

5.4.4.7.2. Costos de Construcción

Se presentan en la siguiente tabla, con base en ecuaciones mostradas por Romero (2008) para este fin (p. 166) que genera valores en dólares del año 1978, con base en el caudal de diseño en m³/d, que es de 4.404,84 m³/d para la unidad de homogeneización y sus unidades preliminares, y de 2.202,42 m³/d para las unidades posteriores a la homogeneización. De acuerdo con la página web Dinero en el Tiempo (2020) la tasa de inflación promedio de Estados Unidos entre los años 1978 y 2020 ha sido del 3,44% anual, por lo que en total, la moneda presentó un aumento del 313,81% entre estos años; esto quiere decir que 1 dólar (USD) de 1978 equivale a 4,14 dólares de 2020.

Tabla 5-8. Costos de Construcción de las EDAR de Biodiscos.

Unidades	Proceso	Ecuaciones de costos	Costos (USD)	
			1978	2020
Desbaste	Tratamiento preliminar	$123.Q^{0,76}$	72.325,6	299.427,98
Desarenador			72.325,6	299.427,98
Homogeneización	Igualamiento	$482.Q^{0,60}$	74.029,55	306.482,34
Sedimentador 1 ^{ro}	Sedimentación 1 ^{ra}	$375.Q^{0,70}$	82.046,75	339.673,55
Biodiscos (incluye al sedimentador 2 ^{do})	Biodiscos	$1.070.Q^{0,77}$	401.251,7	1.661.182,04
Cloración	Cloración para desinfección	$299.Q^{0,65}$	44.520,12	184.313,30
Bombeo	Bombeo del afluente	$730.Q^{0,63}$	144.211,15	597.034,16
Espesamiento de lodos	Espesamiento por gravedad	$216.Q^{0,70}$	47.258,93	195.651,97
Coagulación del lodo	Agregación de químicos	$30.Q^{0,91}$	33.049,16	136.823,52
Lechos de secado	Lechos de secado	$170.Q^{0,73}$	46.856,09	193.984,21
Vertido del agua tratada	Emisario del efluente sobre aguas superficiales	$107.Q^{0,77}$	40.125,17	166.118,20

Edificio de mantenimiento y laboratorio	Edificio de mantenimiento y laboratorio	$1.623.Q^{0.58}$	140.994,00	583.715,16
Total				4.963.834,41

Expresando estos costos en Euros (1 USD = 0,84 Euros), la EDAR de biodiscos de Martín de la Jara y Los Corrales costará en construirla: 4.161.505,04 Euros.

5.4.4.7.3. Costos de Operación y Mantenimiento

Los costos anuales totales de la operación y el mantenimiento de sistemas de tratamiento, según estudios de la USEPA, se calculan a continuación, con base en ecuaciones basadas en el caudal en m³/d, que es de 4.404,84 m³/d para la unidad de homogeneización y sus unidades preliminares (en este caso para el tratamiento primario), y de 2.202,42 m³/d para las unidades posteriores a la homogeneización (en este caso para el tratamiento secundario y otros tratamientos). Estas ecuaciones generan los costos basados en dólares del año 1977 (Romero, 2008, p. 169), y de acuerdo con Dinero en el Tiempo 2 (2020) la tasa de inflación promedio de Estados Unidos entre los años 1977 y 2020 ha sido del 3,51% anual, por lo que en total, la moneda presentó un aumento del 341,54% entre estos años, lo que quiere decir que 1 dólar (USD) de 1977 equivale a 4,42 dólares de 2020.

Tabla 5-9. Costos de Operación y Mantenimiento de las EDAR de biodiscos.

Tratamientos	Ecuaciones de costos	Costos (USD)			
		1977	Factor de mayoración	1977 total	2020
Tratamiento 1rio	$11,02.Q^{1,01}$	52.789,92	2	105.579,85	466.662,92
Tratamiento 2rio	$30,30.Q^{0,96}$	49.048,62	2	98.097,23	433.589,77
Otros tratamientos	$0,48.Q^{1,44}$	31.262,05	5	156.310,25	690.891,29
Total					1.571.143,98

Nota: el factor de mayoración depende del número de unidades que cumplen con ese tipo de tratamiento, por ejemplo, en cuanto al tratamiento primario hay dos, la homogeneización y la sedimentación.

Expresando estos costos en Euros (1 USD = 0,84 Euros), la EDAR de biodiscos conjunta de Martín de la Jara y Los Corrales, costará en mantenerla anualmente: 1.317.192,12 Euros.

5.4.4.8. Ingresos y Egresos Generales de la EDAR de Biodiscos por Etapa de su Ciclo de Vida

Previo determinar esto es necesario estimar previamente: el consumo de energía, las emisiones de GEI, el consumo de reactivos y la generación de lodos:

5.4.4.8.1. Consumo de energía:

- En el bombeo: la bomba deberá elevar el agua residual desde el nivel del suelo hasta el tope de tanque de homogeneización, que tiene una altura total de 4,5 m. Algunas ecuaciones básicas para determinar la potencia de una bomba se muestran a continuación:

$$H(\text{sist}) = \Delta P + \Delta Z + \Delta v + hL$$

Ecuación 1

Para determinar H(sist) se esquematiza el calculo en la siguiente figura:

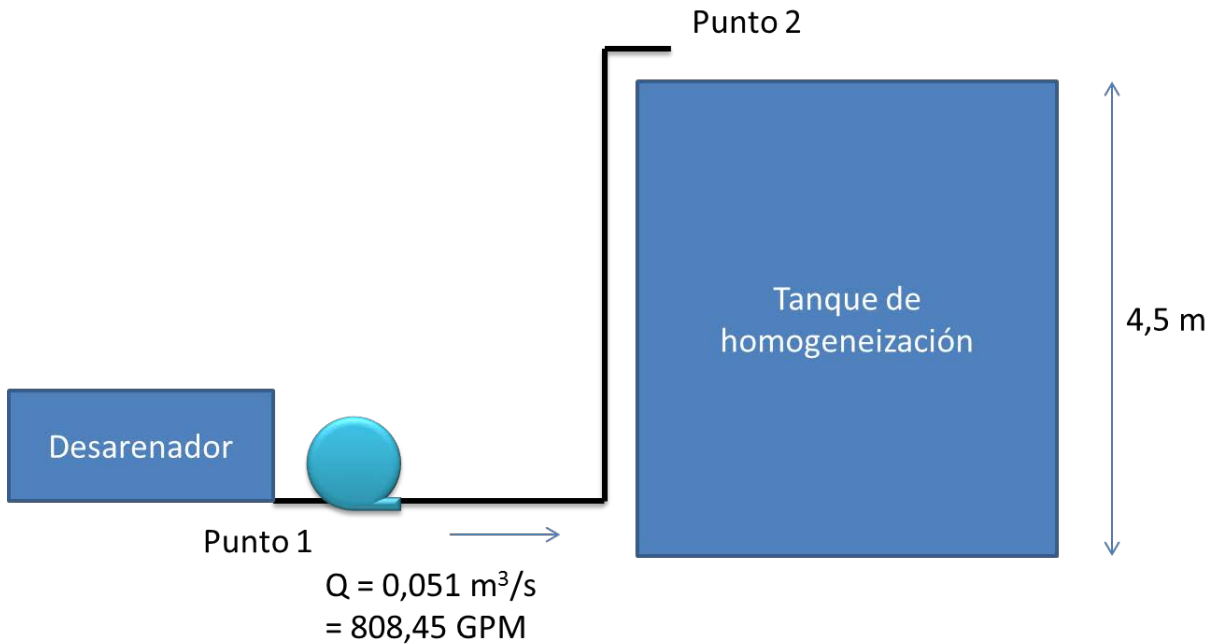


Figura 5-21. Esquema del calculo básico de la bomba.

El cálculo de la variación de la energía de presión (ΔP) se basa en: $P_2 - P_1$, $P_1 = P(\text{atm}) + P(\text{hid})$, donde $P(\text{atm})$ = presión atmosférica, y $P(\text{hid})$ es presión hidrostática. $P_2 = P(\text{atm})$. Sustituyendo: $\Delta P = -P(\text{hid})$. En el presente caso, basta con asumir una pequeña altura de liquido en el desarenado, por ejemplo 1 m: $\Delta P = -1 \text{ m}$. Por su parte la variación de la energía potencial (ΔZ) es: $\Delta Z = Z_2 - Z_1 = 4,5 \text{ m} - 0 \text{ m} = 4,5 \text{ m}$. Por su parte, la variación de la energía cinética (Δv) depende de las velocidades en el punto 1 y 2, a su vez la velocidad en tubería depende del caudal y el diametro del tubo, ambas variables son iguales en el punto inicial y final, por lo que $\Delta v = 0$.

Otra ecuación a emplear es:

$$h_L = \frac{K_{\text{TOT}} * v_2^2}{2 * g}$$

Ecuación 2

Donde:

$$K(\text{tot}) = K(\text{tubo}) + K(\text{accesorios})$$

Ecuación 3

En esta expresión:

$$K_{\text{TUBO}} = \frac{L * f_A}{D}$$

Ecuación 4

Suponiendo una longitud equivalente total (tubos y accesorios) de 10 m, y que una velocidad de 2 m/s es adecuada para el agua en la tubería, su diámetro (D) será de: $D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v}} = \sqrt{\frac{4 * 0,051}{\pi * 2}} = 0,18 \text{ m} = 7 \text{ in.}$

Se requiere el número de Reynolds (Re):

$$\text{Re} = \frac{D * v}{\nu}$$

Ecuación 5

Para de Re ya se tiene D (0,18 m) y v (2 m/s) y la viscosidad cinemática del agua es: $1,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Sustituyendo: $\text{Re} = 2,3 \times 10^5$. Empleando una tubería de acero comercial, el factor de fricción (f_A) de la ecuación 4 se puede determinar a través del siguiente diagrama de Moody:

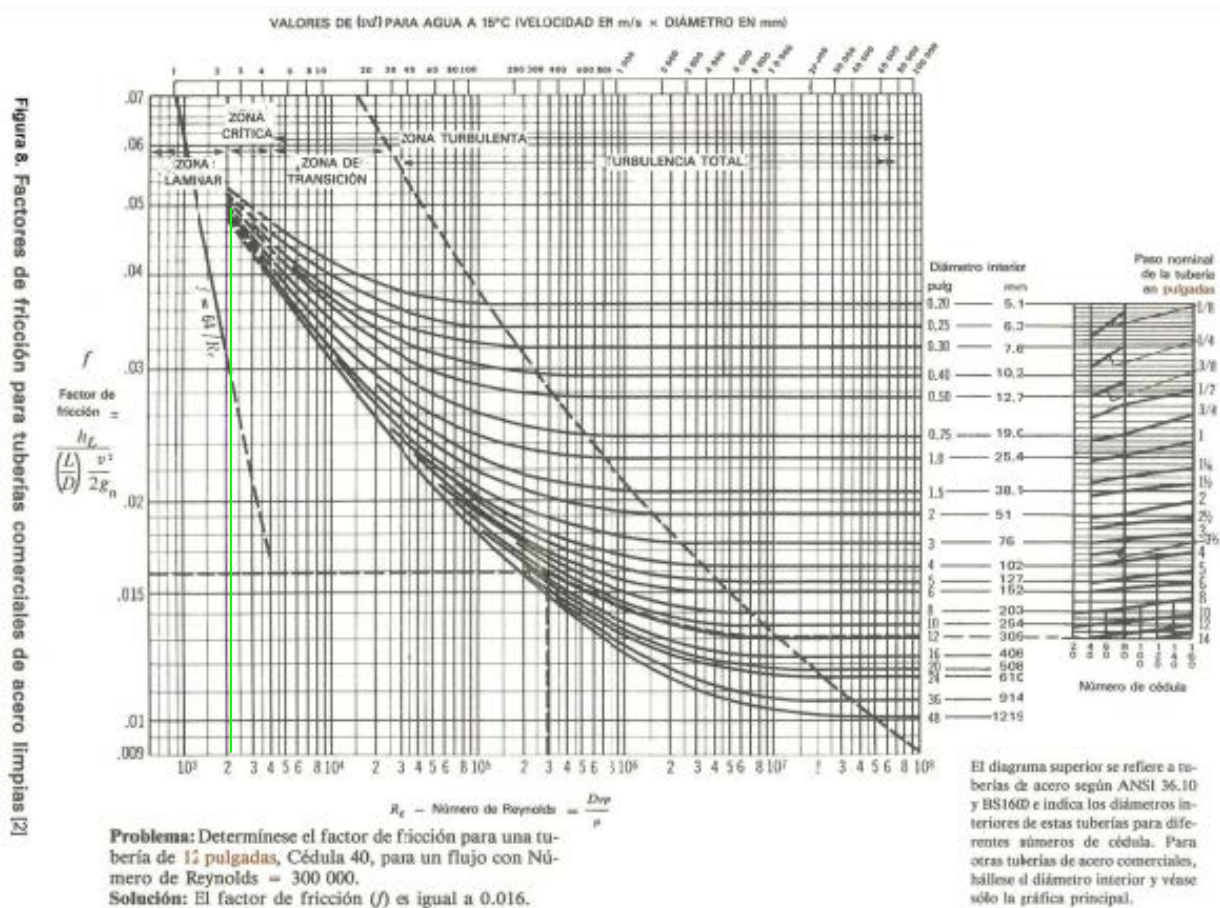


Figura 5-22. Diagrama de Moody para tubos de acero comercial.

El $f_a = 0,047$, así que $K(\text{tot}) = [(10 \text{ m}) \times (0,047)] / 0,18 \text{ m} = 2,61$. Así que: $h_L = [(2,61) \times 2^2] / (2 \times 9,81) = 0,53 \text{ m}$. Por lo que $H(\text{sist}) = (-1 + 4,5 + 0 + 0,53) \text{ m} = 4,03 \text{ m} = 13,22 \text{ pie}$. Con $H(\text{sist})$ se puede calcular la potencia de la bomba, así:

$$\text{WHP} = \frac{H_{\text{sist}} \cdot q}{3960} = (\text{HP}); H_{\text{sist}} = (\text{pie}); q = (\text{gpm})$$

Ecuación 6

Sustituyendo: $\text{WHP} = [(13,22) \times (808,456)] / 3960 = 2,7 \text{ HP} = 2 \text{ kW} = 2 \text{ kJ/s} = 174 \text{ MJ/d teóricos}$

Suponiendo una eficiencia de 70% de la bomba, se consumen: $248,4 \text{ MJ/d reales} = 90.666,00 \text{ MJ/año}$

- En los motores de los biodiscos: ya se estimó que el consumo energético es de $1.417,43 \text{ MJ/d} = 517.361,95 \text{ MJ/año}$
- En el compresor de la mezcla neumática del tratamiento de homogeneización se consume energía. Romero (2008, p. 316) establece que la mezcla para igualamiento oscila entre 3 y 4 W/m^3 , se seleccionan $3,5 \text{ W/m}^3$, lo que para el volumen del homogeneizador de $4.404,84 \text{ m}^3$ (según se determinó previamente y se reflejó en la tabla 5-7) se traduce en: $15.416,94 \text{ W} = 15,42 \text{ kW} = 15,42 \text{ kJ/s} = 1.332,02 \text{ MJ/d} = 486.187,3 \text{ MJ/año}$. Para una eficiencia del compresor del 70%, el valor real es de: $694.553,29 \text{ MJ/año reales}$.
- Sumando: el consumo energético total de la EDAR de biodiscos solo por tratamiento del agua es de $1.302.581,24 \text{ MJ/año}$.

5.4.4.8.2. Emisiones de GEI:

5.4.4.8.2.1. Generalidades de los GEI del tratamiento de las aguas residuales:

Los gases de efecto invernadero (GEI) principales son el CO_2 , gas que suele ser emitido por los procesos aerobios de descomposición de la materia orgánica en el agua residual, y el CH_4 que por el contrario suele ser emitido por los procesos anaerobios de descomposición de la materia orgánica en el agua residual, sin embargo existen otros GEI más. Esto indica que los tratamientos biológicos son una fuente directa de emisión de GEI durante la

etapa de operación de una EDAR, la cual suele durar décadas, por lo que constituye una fuente a analizar. Durante la operación de la EDAR se suelen emplear máquinas (bombas, motores, compresores, etc.), que en su mayoría son accionadas por electricidad, y para la producción de esta energía se emiten GEI en mayor medida; si proviene de plantas termoeléctricas (quema de combustibles fósiles como carbón, fueloil, etc.), y, en menor medida, si la electricidad proviene de plantas hidroeléctricas o menos aún si es generada por otras energías alternativas; por lo que el uso de máquinas en una EDAR es una fuente indirecta de emisión de GEI. Esas máquinas pueden ser accionadas por electricidad producida directamente dentro de la EDAR si la misma cuenta con un generador eléctrico accionado por quema de combustibles fósiles, o incluso, mediante motores o bombas que queman directamente fueloil, o gasolina; en ese caso, las emisiones de GEI son directas. Si la EDAR cuenta con laboratorio y oficinas administrativas que consumen electricidad, y otras energías, se suman emisiones directas o indirectas de GEI.

En la etapa de diseño, sin duda, se emplea electricidad para accionar los ordenadores en los que se elabora el proyecto. Los proyectistas consumen otras energías durante la etapa de diseño, y al realizar los estudios preliminares, como en los laboratorios, en el transporte a campo, en el uso de maquinarias o equipos de muestreo, etc., sin embargo, la etapa de diseño suele ser corta (por ejemplo, un año) en comparación con la etapa de operación, que al menos es de 25 años, y los GEI generados en esta etapa en su mayoría son indirectos.

Los GEI de la construcción de la EDAR pueden ser más significativos que los relacionados con el diseño de la EDAR, pero como la etapa de construcción puede ser de un par de años, es menos impactante que los GEI la operación de la EDAR, que ya se mencionó que puede ser de varias décadas. Sin embargo, durante la construcción se remueve capa vegetal para acondicionar el área, esa vegetación removida se descompone y emite GEI; se emplean maquinarias para realizar movimientos de tierra, se transportan materiales de construcción y escombros, y esas maquinarias y medios de transporte queman combustibles y por lo tanto emiten GEI; además, se adquieren materias primas (arena, cemento, cabillas, tuberías, accesorios de tuberías, cables, paneles eléctricos, bombas y maquinarias, e incluso material de oficina, de laboratorio, etc.) para adelantar la construcción y dejar listas las instalaciones para su posterior operación, y esas materias primas provienen de procesos productivos preliminares en los que ya se emitieron GEI, por lo que los mismos se consideran implícitos o secundarios.

Finalmente, pueden ocurrir emisiones de GEI durante la fase de clausura de la EDAR, pues realizar demoliciones y disposición de escombros implica el uso de maquinarias y medios de transporte que consumen combustibles y emiten GEI; sin embargo, la etapa de clausura puede ser la más corta de todas, durar un par de meses, por lo que de todas las etapas del ciclo de vida de una EDAR, puede ser la menos generante de GEI. Como se aprecia, se requiere de muchos datos para evaluar las emisiones de GEI de la EDAR en sus diferentes etapas, datos que provienen de un proyecto detallado con el que no se cuenta, sin embargo, se conocen algunas características del agua residual, lo que en función del tipo de tratamiento que se le aplicará, permite determinar los GEI de la etapa de operación, y es lo que se hará en el presente proyecto.

No obstante, previo a eso, es necesario conocer cual es la importancia de determinar y controlar las emisiones de GEI, ya que son gases capaces de alterar el efecto invernadero, e incrementar el cambio climático. El clima, de acuerdo con Benavides y León (2007, p. 1) está conexo con el concepto de estabilidad y tiene por misión el análisis de los procesos atmosféricos, determinando sus valores promedio, producto de los cálculos realizados sobre los datos de tiempo atmosférico obtenidos a lo largo de períodos de tiempo, generalmente no menores a 30 años. El clima no ha sido invariable a lo largo de la historia, pues los registros muestran las variaciones del mismo durante varios siglos, pero centrándose en la época actual, a finales del siglo XX y lo que va del siglo XXI, se ha observado uno de los periodos más cálidos y la temperatura media de la Tierra ha mostrado los valores más altos de los últimos 130.000 años. En diciembre de 2007 la Organización Meteorológica Mundial (OMM) expuso que la década comprendida entre los años 1998 y 2007 fue la más caliente de acuerdo a los registros históricos, con un promedio de 14,42°C, que es un poco mayor que el promedio del periodo comprendido entre los años 1961 a 1990, donde fue de 14,00°C).

Para darle respuesta a la causa del incremento de la temperatura media de la Tierra, se debe tener presente que

el planeta cuenta con un mecanismo natural que la hace cálida para la vida. Las dos terceras partes de la energía térmica que devuelve la Tierra al espacio rebotan directamente a la superficie planetaria, lo que viene a constituir una fuente de energía adicional a la radiación solar directa. El efecto neto de esta situación es que la Tierra almacene más energía cerca del suelo de la que podría almacenar si no tuviera atmósfera, originando que la temperatura media global sea más alta. Este fenómeno se denomina efecto de invernadero natural, y sin él la temperatura promedio del planeta sería de aproximadamente -18°C , lo que haría que la vida en el planeta no fuera posible (Benavides y León, 2007, p. 25) o al menos, no tan abundante.

La alteración del efecto invernadero natural ha ocasionado el cambio climático y el calentamiento global. El cambio climático es, en parte, producido por el aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). No obstante, existen diferencias entre variabilidad climática y cambio climático. La variabilidad climática se da cuando, con cierta periodicidad, un fenómeno crea un comportamiento inverosímil del clima, pero de modo temporal, por ejemplo, el fenómeno del Niño. El cambio climático, por otro lado, es un proceso no temporal y se puede comprobar en el tiempo examinando datos climáticos, como la temperatura. (Benavides y León, 2007, p. 30)

Definiendo el cambio climático, según el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) el mismo se refiere al cambio temporal del clima, causado por la variabilidad natural del clima o como consecuencia de las acciones del hombre; por su parte, el Marco de la Convención sobre Cambio Climático, define el cambio climático como la modificación del clima provocada directamente por la actividad humana que altera la composición de la atmósfera y a la que se le suma el cambio debido a la variabilidad natural. (Figueroa y Dávila, 2004, p. 355)

Ahondando en las causas del cambio climático, existen los llamados Factores Forzantes del Clima que favorecen a la variación del mismo, puesto que la atmósfera es obligada a alterar el clima, desde el espacio exterior: forzantes externos, y desde la superficie terrestre: forzantes internos (Benavides y León, 2007, p. 11). Uno de los forzantes internos es la Variación en la Composición Atmosférica, especialmente el acrecentamiento de la concentración los GEI, dado que, aunque pueden ocurrir cambios naturales en la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera, hoy en día, la humanidad es el factor catalizador del incremento de GEI, que influyen (y a su vez son influidos) en el clima. (Ob. Cit., p. 22)

Visto que los GEI son en buena parte, responsables del cambio climático, es necesario conocerlos. Los GEI son constituyentes gaseosos de la atmósfera, que proceden tanto de procesos naturales como antropogénicos; estos gases absorben y emiten radiación de onda larga perteneciente al espectro de la radiación infrarroja, que se desprenden de la superficie de la Tierra y la atmósfera. Los GEI se pueden clasificar como naturales-antrópicos y netamente antrópicos, los primeros son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). Los segundos son los halocarbonos, es decir, compuestos que contienen cloro, bromo o flúor y carbono, y que son GEI muy potentes. Además del CO_2 , el N_2O y el CH_4 , el Protocolo de Kyoto circunscribe entre los GEI al hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC). (Benavides y León, 2007, p. 5)

Los GEI también se pueden clasificar como directos e indirectos. Los primeros son CO_2 , CH_4 , N_2O y los compuestos halogenados. Los segundos son precursores de ozono troposférico. Además, son contaminantes locales del aire ambiente y en la atmósfera se transforman en GEI directos o contaminantes secundarios, en este grupo se encuentran: los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) y el monóxido de carbono (CO), esto, de acuerdo con Benavides y León (2007), (p. 36).

Aclarado lo que son los GEI y su incidencia en el cambio climático, se retoma el tema de las emisiones de GEI en la EDAR de Biodiscos. Al respecto, en WRI, C40 Cities e ICLEI (2014, p. 85) se comenta que las ciudades producen residuos sólidos y aguas residuales (denominados en conjunto “residuos”) que pueden ser dispuestos y/o tratados en las instalaciones dentro de los límites de la ciudad, o transportados a otras ciudades para su tratamiento. La disposición y el tratamiento de residuos producen emisiones de GEI a través de la descomposición aeróbica o anaeróbica, o la incineración.

Esta fuente (WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014) presenta una metodología estandarizada a nivel global para determinar las emisiones de GEI del tratamiento de las aguas residuales. Las aguas residuales municipales

pueden ser tratadas aeróbicamente (en presencia de oxígeno) y anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno). Cuando las aguas residuales son tratadas en condiciones anaerobias, se produce el metano (CH_4). Ambos tipos de tratamiento también generan óxido nitroso (N_2O) a través de la nitrificación y desnitrificación del nitrógeno en las aguas servidas. El N_2O y el CH_4 son GEI potentes que se contabilizan durante el tratamiento de aguas residuales, mientras que el CO_2 proveniente del tratamiento de aguas residuales se considera que es de origen biogénico y es reportado fuera de los alcances. Existen diversas maneras de manejar, recolectar y tratar las aguas residuales. (p. 99)

Las distinciones entre las capacidades y los métodos de manejo de aguas residuales varían mucho entre países y entre ciudades. Dependiendo de la fuente de aguas residuales, por lo general, pueden ser categorizadas como aguas residuales domésticas o aguas residuales industriales, y las ciudades deben reportar las emisiones provenientes de ambas. Las aguas residuales industriales se pueden tratar en el sitio o ser vertidas a los sistemas de alcantarillado doméstico. Cualquier agua residual vertida al sistema de alcantarillado doméstico, sus emisiones se deben incluir con las emisiones de aguas residuales domésticas. (WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014, p. 100)

5.4.4.8.2.2. GEI emitidos directamente por el tratamiento de las aguas residuales en la EDAR de biodiscos:

5.4.4.8.2.2.1. Emisiones de CH_4 en la EDAR de biodiscos:

Para cuantificar las emisiones de metano provenientes del tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas (con el empleo de la ecuación mostrada en la siguiente figura), se requiere conocer: la cantidad de aguas residuales generadas, cómo se tratan las aguas residuales y las aguas servidas, la fuente del agua residual y su contenido orgánico. Esta puede ser estimada en base a la población que atiende la EDAR. También se debe conocer la proporción de las aguas residuales tratadas procedentes de otras ciudades en las instalaciones ubicadas dentro de los límites de la ciudad (como en el presente caso, donde se tratan las aguas residuales municipales de dos poblaciones en una misma EDAR). En muchos países en desarrollo, las aguas residuales se vierten directamente a lagos abiertos, ríos u océanos. Las ciudades pueden asumir las emisiones de esta acción como insignificantes debido a la baja concentración de materia orgánica. (Ob. Cit., p. 100)

Ecuación 8.9 Generación de CH₄ proveniente del tratamiento de aguas residuales

Emisiones de CH ₄ = $\sum_i [(TOW_i - S_i) EF_i - R_i] \times 10^{-3}$		
Descripción		Valor
Emisiones de CH ₄	= Emisiones totales de CH ₄ en toneladas métricas	Computado
TOW _i	Contenido de materia orgánica en las aguas residuales Para las aguas residuales domésticas: compuestos orgánicos totales en las aguas residuales en el año de inventario, kg BOD/año ^{Nota 1} Para las aguas residuales industriales: material total orgánicamente degradable en las aguas residuales de la industria i en el año de inventario, kg COD/año	Ecuación 8.10
EF _i	= Factor de emisión de kg CH ₄ por kg BOD o kg CH ₄ por kg COD ^{Nota 2}	Ecuación 8.10
S _i	= Componente orgánico eliminado en forma de lodo en el año de inventario, kg COD/año o kg BOD/año	Entrada del usuario
R _i	= Cantidad de CH ₄ recuperado en el año de inventario, kg CH ₄ /año	Entrada del usuario
i	Tipo de aguas residuales Para aguas residuales domésticas: grupo de ingresos para cada tratamiento de aguas residuales y sistema de tratamiento Para aguas residuales industriales: material total orgánicamente degradable en las aguas residuales de la industria i en el año de inventario, kg COD/año	Ecuación 8.10

Nota 1: Demanda bioquímica de oxígeno (Biochemical Oxygen Demand, BOD): La concentración de BOD indica solo la cantidad de carbono que es biodegradable en condiciones aerobias. La medición estándar para BOD es una prueba de 5 días, que se denota como BOD₅. El término "BOD" en este capítulo se refiere a la BOD₅.
Nota 2: Demanda química de oxígeno (Chemical Oxygen Demand, COD): La COD mide el total de material disponible para la oxidación química (tanto biodegradable como no biodegradable).
Fuente: Pautas del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, Volumen 5, Capítulo 6: Tratamiento y vertido de aguas residuales

Figura 5-23. Ecuación para calcular la generación de metano proveniente del tratamiento de las aguas residuales. Fuente: WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014, p. 101.

Esta ecuación que se acaba de ver se complementa con la que se muestra a continuación:

Ecuación 8.10 Contenido orgánico y factores de emisión en las aguas residuales domésticas⁵⁵

$$TOW_i = P \times BOD \times I \times 365$$

$$EF_j = B_o \times MCF_j \times U_i \times T_{i,j}$$

Descripción	Valor
TOW_i = Para las aguas residuales domésticas: compuestos orgánicos totales en las aguas residuales en el año de inventario, kg BOD/año	Computado
P = Población de la ciudad en el año de inventario (persona)	Entrada del usuario ⁵⁶
BOD = BOD per cápita específica de la ciudad en el año de inventario, g/persona/día	Entrada del usuario
I = Factor de corrección para la BOD industrial adicional vertidas en el desagüe	En ausencia de la opinión de expertos, una ciudad puede aplicar el valor predeterminado de 1,25 para la recogida de aguas residuales, y 1,00 para las no reguladas. ⁵⁷
EF_j = Factor de emisión para cada sistema de tratamiento y manejo	Computado
B_o = Capacidad máxima de producción de CH_4	Entrada del usuario o valor predeterminado: • 0,6 kg CH_4 /kg BOD • 0,25 kg CH_4 /kg COD
MCF_j = Factor (fracción) de corrección de metano	Entrada del usuario ⁵⁸
U_i = Fracción de la población en el grupo de ingreso i en el año de inventario	
$T_{i,j}$ = Grado de utilización (relación) del sistema o vía de tratamiento/descarga, j , para cada fracción de grupo de ingreso i en el año de inventario	Entrada del usuario ⁵⁹

Fuente: Pautas del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero; Volumen 5, Capítulo 6: Tratamiento y vertido de aguas residuales

Figura 5-24. Ecuaciones para calcular el contenido orgánico y los factores de emisión de las aguas residuales domésticas. Fuente: WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014, p. 102.

En la anterior ecuación se aprecia que se requiere el MCF_i , el cual se puede determinar a partir de la información que se muestra en la siguiente figura:

Tabla 3. Valores propuestos para MFC [34]

<i>Valores de MCF por defecto para las aguas residuales domésticas</i>			
<i>Tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación</i>	<i>Comentarios</i>	<i>MCFI</i>	<i>Intervalo</i>
<i>Sistema sin tratamiento</i>			
Eliminación en río, lago y mar	Los ríos con alto contenido de sustancias orgánicas pueden volverse anaeróbicos.	0,1	0 - 0,2
Cloaca estancada	Abierta y caliente.	0,5	0,4 - 0,8
Cloaca en movimiento (abierta o cerrada)	Correntosa, limpia (cantidades insignificantes de CH ₄ desde las estaciones de bombeo, etc.).	0	0
<i>Sistema tratado</i>			
Planta de tratamiento centralizado aeróbico	Debe ser bien operada. Puede emitir algo de CH ₄ desde las cuencas de decantación y otros tanques.	0	0 - 0,1
Planta de tratamiento centralizado aeróbico	Mal operada. Sobrecarga.	0,3	0,2 - 0,4
Digestor anaeróbico para lodos	Aquí no se considera la recuperación de CH ₄ .	0,8	0,8 - 1,0
Reactor anaeróbico	Aquí no se considera la recuperación de CH ₄ .	0,8	0,8 - 1,0
Laguna anaeróbica poco profunda	profundidad de menos de dos metros: recurrir al dictamen de expertos.	0,2	0 - 0,3
Laguna anaeróbica profunda	profundidad de más de dos metros.	0,8	0,8 - 1,0
Sistema séptico	La mitad del BOD se decanta en tanques anaeróbicos.	0,5	0,5
Letrina	Clima seco, capa freática más baja que la letrina, familia reducida (3-5 personas).	0,1	0,05 - 0,15
Letrina	Clima seco, capa freática más baja que la letrina, uso comunitario (muchos usuarios).	0,5	0,4 - 0,6
Letrina	Clima húmedo/descarga por agua, capa freática más alta que la letrina.	0,7	0,7 - 1,0
Letrina	Extracción frecuente de sedimento para abono.	0,1	0,1

¹ En base al dictamen de expertos de los autores principales de esta sección

Figura 5-25. Valores de MFCi. Fuente: Cristancho, Gámez, Guerra y Dueñas (2018), p. 34.

De la figura anterior se apreció que el sistema de tratamiento que mejor se corresponde con la EDAR de biodiscos (tratamiento biológico aerobio) es el de “Planta de Tratamiento centralizado aeróbico” (bien operada), en cuyo caso MFCi oscila entre 0 y 0,1, por lo que se selecciona un valor promedio de MFC = 0,05. Por su parte los valores de U_i y T_{ij} también se pueden determinar a partir de la información recopilada por Cristancho, Gámez, Guerra y Dueñas (2018, p. 31), donde se aprecia que U_i se incrementa cuando hay mayor población rural, caso contrario a lo que pasa con las cifras reportadas como T_{ij} que su crecimiento se genera con el aumento

del porcentaje que se referencia a nivel urbano. Puesto que Martín de la Jara y Los Corrales son poblaciones relativamente pequeñas, se consideran en su mayoría rural, así que se seleccionó un valor de 75% de población rural y 25% de población urbana, en cuyo caso $U_i = 0,34$ (U) y $T_{ij} = 0,22$ (Tj).

Con estos datos recopilados ya se puede aplicar la ecuación apreciada en la figura 5-23, que se muestra a continuación (sin los símbolos de sumatoria: Σ , ni de “i” dado que se consideran varios datos “i” y los mismos se suman, si se cuenta con varios poblados o ciudades, en este caso se obtiene un solo resultado global, dado que el vertido de las dos poblaciones es integrado o mezclado en una sola EDAR) aplicada exclusivamente para condiciones domésticas (o urbanas, pues para condiciones industriales, en general se aprecia que el cálculo se basa en la DQO):

$$\text{Emisión de CH}_4 = [(TOW - S) \cdot EF - R] \times 10^{-3} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: $TOW \equiv \text{kg(DBO)/año}$

$S = \text{DBO eliminada al lodo} \equiv \text{kg(DBO)/año}$

$EF = \text{Factor de emisión} \equiv \text{kg(CH}_4\text{)/kg(DBO)}$

$R = \text{Cantidad de CH}_4 \text{ recuperada al año} \equiv \text{kg(CH}_4\text{)/año}$

Por su parte:

$$TOW = P \cdot DBO \cdot I \cdot 365 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde: P = población

$DBO = \text{DBO per cápita (g/hab.d)}$

I = factor de corrección para la BOD industrial adicional vertida en el desagüe. En ausencia de la opinión de expertos, una ciudad puede aplicar el valor predeterminado de 1,25 para la recogida de aguas residuales, y 1,00 para las no reguladas

Otra ecuación a usar es:

$$EF = B_0 \cdot MCF \cdot U \cdot T_j \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde: B_0 = capacidad máxima de producción de CH_4 . Entrada del usuario o valor predeterminado: 0,6 $\text{kg(CH}_4\text{)/kg(DBO)}$

$MCF = \text{factor (fracción) de corrección de metano}$

$U = \text{Fracción de la población en el grupo de ingreso en el año de inventario}$

$T_j = \text{Grado de utilización (relación) del sistema o vía de tratamiento/descarga, j, para cada fracción de grupo de ingreso en el año de inventario}$

Se inicia el cálculo con el empleo de la ecuación 8, siendo $P = 10.011$ habitantes para el año 2030 y para ambas poblaciones sumadas (Martín de la Jara y Los Corrales), $DBO \text{ per cápita} = 79,09 \text{ g(DBO)/hab.d}$ (como ya se mostró previamente en la figura 5-7), $I = 1,25$ pues se cuenta con el diseño de la red cloacal conjunta, sustituyendo:

$$TOW = P \cdot DBO \cdot I \cdot 365 = (10.011) \times (79,09) \times (1,25) \times (365) = 361.245.057,90 \text{ kg(DBO)/año}$$

A continuación se emplea la ecuación 9, donde $B_0 = 0,6$; $MCF = 0,05$, $U = 0,34$ y $T_j = 0,22$. Sustituyendo:

$$EF = B_0 \cdot MCF \cdot U \cdot T_j = (0,6) \times (0,05) \times (0,34) \times (0,22) = 2,244 \times 10^{-3} \text{ kg(CH}_4\text{)/kg(DBO)}$$

Ya se puede aplicar la ecuación 7, donde S se calcula previamente así:

$$S = [(DBO_0 - DBO_f) \cdot (Q/1.000)] \cdot 365 = [(360 - 34,7) \cdot (2.202,42/1.000)] \cdot 365 = 261.503,24 \text{ kg(DBO)/año}$$

Por su parte, $R = 0$ (no se han considerado unidades de recuperación de metano). Sustituyendo:

$$\begin{aligned} \text{Emisión de CH}_4 &= [(TOW - S) \cdot EF - R] \times 10^{-3} \\ &= [(361.245.057,90 - 261.503,24) \times (2,244 \times 10^{-3}) - 0] \times 10^{-3} \\ &= 810,05 \frac{\text{Tm(CH}_4\text{)}}{\text{año}} \text{ para el año 2030 para la EDAR de biodiscos} \end{aligned}$$

5.4.4.8.2.2.2. Emisiones de N_2O en la EDAR de biodiscos:

Por otro lado, las emisiones de óxido nitroso (N_2O) pueden producirse como emisiones directas provenientes de las plantas de tratamiento o como emisiones indirectas provenientes de las aguas residuales después de la eliminación de los efluentes en canales, lagos o mares. Las emisiones directas de nitrificación y desnitrificación en las plantas de tratamiento de aguas residuales se consideran como una fuente menor y no suelen ser

cuantificados. Por lo tanto, solo se hace referencia a las emisiones indirectas de N₂O provenientes de los efluentes del tratamiento de aguas residuales que son vertidos en los ambientes acuáticos. (WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014, p. 103)

El cálculo se realiza con la siguiente ecuación:

Ecuación 8.11 Emisiones indirectas de N₂O provenientes de efluentes de aguas residuales

Emisiones N ₂ O =		
$[(P \times \text{Proteína} \times F_{\text{NPR}} \times F_{\text{NON-COM}} \times F_{\text{IND-COM}}) - N_{\text{LODO}}] \times EF_{\text{EFLENTE}} \times 44/28 \times 10^{-3}$		
Descripción		Valor
Emisiones de N ₂ O	= Total de emisiones de N ₂ O en toneladas	Computado
P	= Población total servida por la planta de tratamiento de aguas	Entrada del usuario
Proteína	= Consumo anual per cápita de proteínas, en kg/persona/año	Entrada del usuario
F _{NON-COM}	= Factor de ajuste para la proteína no consumida	1,1 para países que no tienen trituradores de basura, 1,4 para los países con eliminación de basura
F _{NPR}	= Fracción de nitrógeno en proteínas	0,16, kg N/kg de proteína
F _{IND-COM}	= Factor para proteínas industriales y comerciales co-vertida en el sistema de desagüe	1,25
N _{SLUDGE}	= Nitrógeno eliminado con lodos, kg N/año	Entrada del usuario o valor predeterminado: 0
EF _{EFLENTE}	= Factor de emisión para las emisiones de N ₂ O de la descarga a las aguas residuales en N ₂ O-N por kg N ₂ O	0,005
44/ 28	= Conversión de kg de N ₂ O-N a kg N ₂ O	

Fuente: Pautas del IPCC de 2006 para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, Volumen 5, Capítulo 6: Tratamiento y vertido de aguas residuales

Figura 5-26. Ecuación para calcular las emisiones indirectas de N₂O provenientes de efluentes de aguas residuales. Fuente: WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014, p. 103

Para realizar el cálculo con la ecuación antes vista, la propia fuente aporta gran parte de los datos que se deben sustituir, excepto la población, que es conocida (10.011 habitantes para el año 2030 de ambas poblaciones: Martín de la Jara y Los Corrales) y el consumo anual per cápita de proteína, el cual suele estar relacionado con la producción y consumo de proteína animal (carne de cerdo, de res, y los diferentes tipos de lácteos) principalmente. Este último dato se investigó y resultó ser de: 94,04 kg(carne)/hab.año y 165,03 kg(lácteos)/hab.año para el año 2013, para España, de acuerdo con Greenpeace (2018), en total, el valor es de: 259,07 kg(proteína)/hab.año. Sustituyendo los datos en la ecuación para calcular las emisiones indirectas de N₂O provenientes de efluentes de aguas residuales, se obtiene el siguiente resultado:

$$\text{Emisiones de N}_2\text{O} = [(10.011 \times 259,07 \times 0,16 \times 1,4 \times 1,25) - 0] \times 0,005 \times (44/28) \times 10^{-3} =$$

5,71 Tm(N₂O)/año para el año 2030 para la EDAR de biodiscos

5.4.4.8.2.2.3. Emisiones de CO₂e en la EDAR de biodiscos:

La conversión de los datos a unidades estándar de CO₂ equivalente (CO₂e) de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (unidades SI), es la unidad que se debe utilizar para la medición y el reporte de datos de actividad, y todos los datos de emisiones de GEI se deben comunicar en toneladas métricas de cada GEI así como en CO₂e. Cuando solo este último está disponible, este deberá estar claramente identificado y justificado con el fin de estar en conformidad con el Protocolo Global en materia. El CO₂e es una unidad de medición universal que explica el potencial de calentamiento global (PCG) cuando se miden y comparan las emisiones de GEI de diferentes gases. Los GEI individuales deben convertirse en CO₂e multiplicando por los coeficientes de

PCG para 100 años en la versión más reciente de las Pautas del IPCC o la versión utilizada por el organismo del inventario nacional del país. (WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014, p. 50)

De acuerdo con los valores de PCG del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, para el CH₄ su PCG = 28 y para el N₂O su PCG = 265 (WRI, C40 Cities e ICLEI, 2014, p. 51). Con estos valores se calcula el CO₂e total de las emisiones directas del tratamiento del agua residual en la EDAR de biodiscos, así:

$$Tm(CO_2e)/año = [Tm(CH_4)/año].PCG(CH_4) + [Tm(N_2O)/año].PCG(N_2O)$$

$$Tm(CO_2e)/año = (810,05) \times (28) + (5,71) \times (265) = \mathbf{24.194,55 \text{ Tm}(CO_2e)/año \text{ para el año 2030 para la EDAR de biodiscos}}$$

5.4.4.8.2.3. GEI emitidos indirectamente por el uso de maquinas eléctricas en el tratamiento de las aguas residuales en la EDAR de biodiscos:

Ya se calculó previamente que la bomba que alimenta el homogeneizador, el compresor que mezcla el homogeneizador y los motores que hacen girar los biodiscos, en conjunto consumiran unos 1.302.581,24 MJ/año = 361.828,12 kWh/año. Por su parte, de acuerdo con el Gobierno de España y OECC (2020, p. 9) el factor de emisión del mix eléctrico es el valor que expresa las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de la electricidad que se consume y, por tanto, es un indicador de las fuentes de energía utilizadas para producir dicha electricidad, cuanto más bajo es el mix, mayor es la contribución de fuentes energéticas de origen renovable o bajas en carbono. La Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad (GdO) es una acreditación expedida por la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) que asegura que una cantidad determinada de energía eléctrica, medida en Wh, se ha obtenido a partir de fuentes renovables y cogeneración de alta eficiencia, en un periodo determinado. Esta fuente muestra los factores del Mix eléctrico desde el año 2007 hasta el 2019, de las diferentes comercializadoras españolas que han formado parte del Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad (GdO). Cabe destacar que en la primera fila de cada año, se indica el factor de emisión del mix eléctrico a aplicar para todas aquéllas comercializadoras que no han formado parte de este sistema de GdO durante el año indicado.

De acuerdo con esa fuente, para el año 2019 las comercializadoras sin GdO deben emitir un máximo de 0,31 kg CO₂/kWh. Con este dato se calcula la emisión de CO₂ por consumo eléctrico de las diferentes maquinas de la EDAR de biodiscos, así:

$$\frac{361.828,12 \text{ kWh}}{\text{año}} \times \frac{0,31 \text{ kg CO}_2}{\text{kWh}} = 112.166,72 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

$$= \mathbf{112,17 \frac{Tm(CO_2)}{año} \text{ por consumo eléctrico de las diferentes maquinas de la EDAR de biodiscos}}$$

5.4.4.8.3. Consumo de reactivos:

Se consumiran dos reactivos en la EDAR de Biodiscos, cloro para desinfección y coagulante para el espesado de lodos

- Cloro para desinfección: de acuerdo con METCALF & EDDY, INC. (1995, p. 565) el intervalo de dosis de cloro para desinfección de un efluente del tratamiento biológico aerobio puede adoptarse como 8 mg(cloro)/L. El investigador recomienda usar como reactivo de cloración hipoclorito de sodio (pues se recomienda usar cloro gas en grandes plantas que atienden a más de 50.000 habitantes, cloro líquido en plantas medianas y cloro sólidos en pequeñas plantas de menos de 5.000 habitantes), las propiedades de este reactivo de cloro se aprecian en la siguiente figura:

Tabla XI.1. Propiedades del cloro y sus derivados

Símbolo o fórmula	Cl ₂	Cl ₂	NaOCl	Ca(OCl) ₂
Peso molecular	70.90	70.90	74.45	142.99
Estado	Gas	Líquido	Líquido	Granular
Color	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo
Peso específico (aire=1, agua= 1)	2.48 O°C y at	1.41 (20°C)	1.2	0.8
Punto de congelación		- 100.98		
Punto de licuefacción (ebullición)	- 34.5°C (1 at)	- 35.5°C (1 at)		
Cloro disponible	99.8 %	99.8 %	12 - 15 %	70%
Forma de empaque		Cilindros de 100, 150 y 2000 lb	Barriles	Barriles, sacos.
Materiales que resisten el ataque:	Seco: hierro negro, cobre y acero. Húmedo: vidrio, plata, caucho.	Seco: hierro negro, cobre y acero. Húmedo: PVC, teflón, polietileno.	Cerámica, vidrio, plástico o caucho.	Cerámica, vidrio, plástico o caucho.

Figura 5-27. Propiedades del cloro y sus derivados. Fuente: Arboleda, 2000, p. 646.

Seleccionando un porcentaje de cloro disponible de 13,5%, a continuación se calcula el consumo anual del reactivo:

$$\frac{8 \text{ mg}(\text{cloro})}{L} \times \frac{100 \text{ mg}(\text{NaOCl})}{13,5 \text{ mg}(\text{cloro})} \times \frac{2202,42 \text{ m}^3}{d} \times \frac{1000 L}{1 \text{ m}^3} \times \frac{365 d}{1 \text{ año}} \times \frac{1 \text{ Tm}}{10^9 \text{ mg}} = 47,64 \frac{\text{Tm}(\text{NaOCl})}{\text{año}}$$

- Coagulante para espesado de lodos: se requieren dosis de 1 a 6 mg/L de FeCl₃ o de 5 a 12 mg/L de CaO (Romero, 2008, p. 780). Se selecciona una dosis de 4 mg(FeCl₃)/L (este reactivo posee un porcentaje de pureza entre 37 y 47, se selecciona 42%) y se calcula el consumo anual del reactivo, así:

$$\frac{4 \text{ g}(\text{FeCl}_3)}{\text{m}^3} \times \frac{2202,42 \text{ m}^3}{d} \times \frac{365 d}{1 \text{ año}} \times \frac{1 \text{ Tm}}{1000000 \text{ g}} \times \frac{42 \text{ g}(\text{FeCl}_3 \text{ puro})}{100 \text{ g}(\text{FeCl}_3)} = 1,351 \frac{\text{Tm}(\text{FeCl}_3 \text{ puro})}{\text{año}}$$

5.4.4.8.4. Generación de lodos

El valor de interés es el lodo deshidratado que debe disponerse al final del proceso, para ello, hay que conocer las propiedades del lodo, como su porcentaje de humedad, que es: 95% en el lodo primario, 92% en el lodo secundario (Romero, 2008, p. 759). El Lodo primario crudo y húmedo posee 54 g(sólidos secos)/hab.d y el lodo secundario húmedo posee 20 g(sólidos secos)/hab.d (ob. Cit., tabla 26.5, p. 775). Ya se ha mencionado que el tratamiento de lodo consiste en espesado y lechos de secado, de este último el lodo se puede retirar cuando tenga entre 30 a 40 % de sólidos (ob. Cit., tabla 26.25, p. 833), se selecciona un 35% de sólidos como valor medio, o que tenga 65% de humedad. Con estos datos se puede calcular la producción de lodos, así:

- Lodo primario:

$$\frac{54 \text{ g(sólido seco)}}{\text{hab. d}} \times \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \times 10011 \text{ hab} \times \frac{1 \text{ Tm}}{1000000 \text{ g}} = 197,32 \frac{\text{Tm(sólido seco)}}{\text{año}}$$

$$197,32 \frac{\text{Tm(sólido seco)}}{\text{año}} \times \frac{95 \text{ Tm(agua)}}{5 \text{ Tm(sólido seco)}} = 3749,02 \text{ Tm(agua)/año}$$

- Lodo secundario:

$$\frac{20 \text{ g(sólido seco)}}{\text{hab. d}} \times \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \times 10011 \text{ hab} \times \frac{1 \text{ Tm}}{1000000 \text{ g}} = 73,08 \frac{\text{Tm(sólido seco)}}{\text{año}}$$

$$73,08 \frac{\text{Tm(sólido seco)}}{\text{año}} \times \frac{92 \text{ Tm(agua)}}{8 \text{ Tm(sólido seco)}} = 840,42 \text{ Tm(agua)/año}$$

- Lodo total húmedo:

$$197,32 \frac{\text{Tm(sólido seco)1rio}}{\text{año}} + 73,08 \frac{\text{Tm(sólido seco)2rio}}{\text{año}} = 270,4 \frac{\text{Tm(sólido seco)Tot}}{\text{año}}$$

$$3749,02 \frac{\text{Tm(agua)1rio}}{\text{año}} + 840,42 \frac{\text{Tm(agua)2rio}}{\text{año}} = 4589,84 \frac{\text{Tm(agua)Tot}}{\text{año}}$$

$$270,4 \frac{\text{Tm(sólido seco)Tot}}{\text{año}} + 4589,84 \frac{\text{Tm(agua)Tot}}{\text{año}} = 4859,84 \frac{\text{Tm(lodo)Tot humedo}}{\text{año}}$$

- Lodo total deshidratado que debe ser dispuesto de manera apropiada:

$$270,4 \frac{\text{Tm(sólido seco)Tot}}{\text{año}} \times \frac{100\%}{35\%} = 772,57 \frac{\text{Tm(lodo)Tot deshidratado}}{\text{año}}$$

5.4.4.8.5. Ingresos y Egresos Generales de la EDAR de Biodiscos por Etapa de su Ciclo de Vida:

Se contabilizan en la siguiente tabla:

Tabla 5-10. Ingresos y Egresos Generales de la EDAR de Biodiscos por Etapa de su Ciclo de Vida.

<i>Etapas del ciclo de vida de la EDAR</i>	<i>Procesos</i>	<i>Ingresos</i>	<i>Egresos</i>
Diseño	Actualización del PROYECTO DE CONCENTRACIÓN DE VERTIDOS DE MARTÍN DE LA JARA – LOS CORRALES. (SEVILLA) para incorporar la EDAR de Biodiscos	Estudios individuales: por ejemplo, de geología, climatología, hidrología, caracterización, entre otros.	PROYECTO DE DISEÑO DE LA EDAR DE BIODISCOS PARA TRATAR LAS AGUAS RESIDUALES CONCENTRADAS DE MARTÍN DE LA JARA – LOS CORRALES. (SEVILLA)
		Personal: Ingenieros, Técnicos, Analistas, etc.	
Construcción	Ocupación del terreno	Adquisición del terreno de 5.000,00 m ²	Dinero de la compra del terreno que ocupará la EDAR: 1.669.650,00 Euros
	Construcción de la EDAR	Personal para la construcción	Dinero por el cubrimiento de los costos de construcción de la EDAR: 4.161.505,04 Euros.
		Maquinaria de construcción	
Operación y mantenimiento	Operación	Consumo de energía eléctrica total: 1.302.581,24 MJ/año	Emisiones de GEI totales: 24.306,72 Tm(CO ₂ e)/año
		Consumo de reactivos: 47,64 Tm(NaOCl)/año + 1,351 Tm(FeCl ₃)/año	Generación de lodos deshidratados a disponer: 772,57 Tm/año
	Mantenimiento	Personal de mantenimiento (y de operación)	Dinero para cubrir los costos anuales por el mantenimiento (y operación) de la EDAR: 1.317.192,12 Euros/año
		Insumos de mantenimiento (y operación)	

5.4.5. Prediseño Básico de la EDAR con Sistema de Filtros Verdes en Flotación

5.4.5.1. Generalidades del Tratamiento

5.4.5.1.1. Denominación adecuada del tratamiento: de acuerdo con Salas, J., s.f. la denominación más correcta del tratamiento es “Filtro Flotante de Helófitas”, que podría abreviarse como FFH, ya que el término “macrófita” se refiere a plantas visibles a simple vista y es muy general. Entre este tipo de plantas están las macrófitas emergentes y entre ellas se encuentran las plantas anfibias o palustres que se utilizan en los sistemas de flotación, las cuales, en la terminología científica se conocen como “helófitas”. Las estaciones de fitodepuración de aguas residuales construidas en base a plantas acuáticas se deberían denominar EFAR, para distinguirlas de las EDAR convencionales. Por lo tanto, siguiendo estas recomendaciones, de aquí en adelante se hará referencia a este sistema de tratamiento como: **EFAR de Filtro Flotante de Helófitas** o EFAR FFH.

5.4.5.1.2. Base del tratamiento: el tratamiento del agua con helófitas en flotación se basa en aprovechar la propiedad que tienen las plantas anfibias de transferir el oxígeno atmosférico a sus raíces, en las cuales, existen biopelículas que consumen la materia orgánica biodegradable del agua residual. Este tratamiento se asemeja al que ocurre en los procesos convencionales que se dan en Humedales Artificiales, pero se diferencian entre sí ya que las plantas en la EFAR FFH no se encuentran enraizadas en un sustrato de grava, ni en el fondo del humedal, sino que flotan en la superficie del agua, formando un manto flotante natural, con las raíces libres bañadas por el agua residual. (Ob. Cit.)

De acuerdo con JOCA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, S.A. y URBAJA PROMOCIONES Y CONSTRUCCIONES (2009), las plantas conocidas como macrofitas son pequeñas plantas que puedan vivir en terrenos inundados toda su vida o durante largos periodos de tiempo encharcadas. También algunos las conocen como plantas palustres y su porte alcanza una cierta importancia, se puede considerar comprendido entre los 30 -120 cm en los juncos, en los esparganios entre 60 y 130 cm, en las eneas entre 120 y 240 cm, y en los carrizos entre 160 y 320 cm. El porte depende del poder nutricional del medio en que se encuentre. Este sistema inundado propicia el medio natural ideal para el desarrollo de la vida, en un vasto abanico de diversidad de especies. Las macrofitas se encargan de que tanto el agua, como los fangos no pasen a condiciones eutrificantes y sea un medio saludable tanto para los mamíferos, como para las aves; las macrofitas segregan ácidos que matan a las bacterias. (MEMORIA, p. 18 - 19)

Las depuradoras de Macrofitas si se proyectan adecuadamente, pueden tener el aspecto natural que tienen los humedales y lograr el mismo ambiente, por lo que pueden ser utilizados para el uso recreacional de las personas. En el año 2001 en la convención celebrada en Sevilla dedicada a la depuración de las aguas residuales para los países del entorno del mediterráneo, se presentó un trabajo sobre los filtros que utilizaban Macrofitas, confirmando que éstos eran iguales de eficientes en invierno como en verano. Esto condujo a estudiar el seguimiento del oxígeno dentro de las estructuras de las plantas, y se comprobó que permiten pasar, desde su parte emergente (hojas) hacia el interior de éstas, solamente del oxígeno que está en el aire. (JOCA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, S.A. y URBAJA PROMOCIONES Y CONSTRUCCIONES, 2009, MEMORIA, p. 19)

Al contar con una red de conductos huecos, dispuestos en todo el conjunto de su estructura vegetal para recibir o emitir el oxígeno dependiendo de la presión isostática de oxígeno de la zona, el proceso se da tanto en sus hojas, como en los tallos. Por la superficie de las raíces y los rizomas en su medio natural, siempre se emite o expulsa el oxígeno al entorno exterior; a mas tendencia eutrificante, mas oxígeno tiende a salir por la raíz o por el rizoma, con lo que el medio recibe una cantidad de oxígeno que le impide entrar en condiciones atóxicas. Siempre el macrofito toma el oxígeno del aire que le rodea siendo las zonas emergidas de las hojas las únicas capaces de transferir oxígeno al interior. El oxígeno tiende a pasar de la superficie exterior de la hoja al interior de los tubos de ésta. La presión isostática de oxígeno en los huecos es siempre menor que la del aire exterior, por tener este último menos concentración de oxígeno. Así pues, el oxígeno que pasa a la hoja en la zona que

emerge del agua, empieza a distribuirse y equilibrarse entre todos los tubos colaterales y a lo largo de cada uno de ellos, descendiendo por estos hacia las raíces. (Ob. Cit., 2009, MEMORIA, p. 19 - 20)

Las plantas acuáticas de los humedales tales como carrizos, juncos, eneas o espagranios (macrofitas emergentes) están adaptadas a vivir en aguas con elevada carga orgánica, debido principalmente a su sistema natural de aireación de las raíces. Utilizando su propia energía, procedente en última instancia de la energía solar captada por fotosíntesis; estas plantas son capaces de enviar el oxígeno hasta sus raíces por medio de los microorganismos que viven asociados al sistema radicular de la planta. Además, las plantas ejercen una depuración directa por la absorción de iones contaminantes, tanto metales pesados como aniones eutrofizantes (nitratos y fosfatos principalmente). Por este motivo, este tipo de plantas acuáticas se vienen utilizando en humedales artificiales para depuración de aguas residuales, en los que las plantas se establecen en un lecho de grava o arena, a través del cual circula el agua residual. (Ob. Cit., 2009, MEMORIA, p. 20)

5.4.5.1.3. Ventajas del sistema (Ob. Cit., 2009, MEMORIA, p. 21):

- Sistema natural, totalmente respetuoso e integrado con el medio ambiente, que elimina sólidos en suspensión, materia orgánica, elementos eutrofizantes y microorganismos patógenos.
- No produce malos olores ni genera lodos en cuantía significativa, ya que son autoasimilados por el sistema.
- Coste de instalación muy inferior al de una depuradora convencional.
- Mantenimiento sencillo, con bajo coste y reducido o nulo consumo de energía.
- Mayor capacidad de depuración que los humedales artificiales convencionales, por estar todo el sistema radicular bañado por el agua.
- Facilidad de cosechar la totalidad de la biomasa producida con la posibilidad de emplearla en diversos usos industriales (energía, fibras, almidón, etc...) o para nutrición animal o producción de compost, siempre que no contenga elementos nocivos tales como metales pesados.

5.4.5.1.4. Flotación de las plantas: para lograr la flotación de las helófitas se debe tener en cuenta que las mismas tienen menor densidad que el agua, ya que este tipo de plantas poseen un tejido esponjoso denominado aerénquima, por ejemplo, la espadaña, y toda aquella sustancia más ligera que el agua, flota sobre ella, por lo que solo se necesita ayudarles a flotar en posición vertical durante la etapa inicial de su desarrollo. Eso se puede conseguir introduciendo los plantones a soportes lineales huecos, como mangueras de polietileno (por ejemplo, de 16 mm de diámetro), que flotan sobre la superficie del agua. Una vez que las raíces de las plantas se entrelazan con las del resto de las plantas adyacentes, por lo que se forma una plataforma flotante libre con raíces, rizomas, bases de tallos, entre otras partes de las helófitas, que ya no tienen necesidad de seguir dependiendo de los soportes iniciales. En otros casos, con los canales vacíos, la plataforma flotante se forma haciendo crecer los plantones en el fondo del canal, sobre una malla de polietileno y cuando se había conseguido la trabazón de las raíces y rizomas, formando un manto continuo, se elevaba el nivel del agua y el conjunto flotaba formando una plataforma flotante. (Ob. Cit.)

5.4.5.2. Parámetros de Diseño

5.4.5.2.1. Parámetros de dimensionamiento: la temperatura influye de dos formas opuestas en cuanto a la eliminación de la materia orgánica del agua residual. Por una parte, la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye al aumentar la temperatura y, por otro lado, la velocidad de las reacciones químicas aumenta con el aumento de temperatura. Sin embargo, la temperatura de los sistemas abiertos tiene una gran variabilidad, no solo a lo largo del año, sino dentro de cada día, por lo que, según los datos recopilados durante los últimos 7 años sobre las analíticas realizadas en la EFAR de Fabara (de la que más adelante se dan más detalles) en las cuatro estaciones del año, se observó que la variación anual de la eficiencia media en la eliminación de la DBO₅ varía poco, en el orden del 10% como máximo, siendo algo mayor, la eficiencia en la época calurosa. A nivel práctico, la superficie requerida para instalar una EFAR FFH por

habitante equivalente en España varía entre 1,5 m² para las zonas de clima cálido, hasta los 3 m² para las zonas de clima continental. (Ob. Cit.)

El diseño de este sistema de tratamiento se ha basado en el empleo de canales (no de balsas, ya que en éstas es imposible efectuar el mantenimiento adecuado del filtro, como siegas periódicas o reposiciones de marras, y también resulta más difícil de controlar la distribución homogénea del flujo del agua residual a lo largo de todo su recorrido). En opinión de Salas (s.f.), lo más importante es la anchura de los canales, con independencia de la longitud total. La anchura máxima de la parte superior de los canales no debería superar los 4 metros, para permitir realizar el mantenimiento del filtro de forma correcta.

Debido al abundante crecimiento de las raíces y rizomas de las macrofitas emergentes instaladas en los humedales artificiales, al cabo de un cierto tiempo el lecho de fijación tiende a colmatarse, por lo que la cantidad de agua que pasa a su través se reduce considerablemente y por lo tanto se pierde parcialmente la efectividad del sistema como filtro biológico. Para eludir el problema de la colmatación que se produce en los humedales artificiales convencionales, se ha desarrollado un sistema, que consigue la depuración de las aguas residuales utilizando macrofitas de tipo emergente transformadas en flotantes, lo que evita la colmatación, con la ventaja de aumentar considerablemente la superficie de contacto de la rizosfera con el agua residual. En este sistema, las plantas (seleccionadas entre las de tipo “emergente”, adaptadas a la climatología del lugar) forman un tapiz flotante sobre la superficie de un canal o laguna con su sistema radicular, los rizomas y la base de los tallos sumergidos en el agua. El conjunto de la zona sumergida tienen una gran superficie específica, debido principalmente al gran número de ralees y raicillas que actúan de soporte para la fijación de los microorganismos que degradan la materia orgánica. (JOCA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, S.A. y URBAJA PROMOCIONES Y CONSTRUCCIONES, 2009, MEMORIA, p. 20)

Esta misma fuente propone el uso de una laguna DCD-FMF y dos lagunas FMF. Los valores de diseño que allí se emplearon, se tomaron de manera directa y aplicando ingeniería inversa, los mismos se pueden consultar en la siguiente fuente: (ob. Cit., MEMORIA, p. 21 – 22, y ANEJO N° 11 DIMENSIONAMIENTO FUNCIONAL, p. 8 – 10) y se listan a continuación:

Laguna DCD-FMF:

- N° de lagunas: 1
- $Q(\text{diseño}) = Q(\text{medio})$
- $L(\text{superior}) = 1,833 \times W(\text{superior})$
- $L(\text{agua}) = 0,9607 \times L(\text{superior})$
- $W(\text{agua}) = 0,9302 \times W(\text{superior})$
- $L(\text{agua}) = 1,833 \times W(\text{agua})$
- $h_l = 3,5 \text{ m}$
- $BL = 30 \text{ cm}$
- $TRH = 2,853 \text{ d}$
- $L(\text{inferior}) = 0,523 \times L(\text{superior})$
- $W(\text{inferior}) = 0,1163 \times W(\text{superior})$
- Remoción: $80 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$
- 20 plantas/m^2

Laguna FMF:

- N° de lagunas: 2
- $Q(\text{diseño}) = Q(\text{medio})$
- $L(\text{superior}) = 2,63 \times W(\text{superior})$
- $L(\text{agua}) = 0,9735 \times L(\text{superior})$
- $W(\text{agua}) = 0,9302 \times W(\text{superior})$
- $L(\text{agua}) = 2,75 \times W(\text{agua})$
- $h_l = 1,5 \text{ m}$

- BL = 30 cm
- TRH = 3,013 d
- L(inferior) = 0,8407xL(superior)
- W(inferior) = 0,5814xW(superior)
- Remoción: 50 g/m².d
- 10 plantas/m²
- Talud: h/v = 1,5

5.4.5.2.2. Rendimiento del tratamiento: este tipo de tecnología ha sido aplicada en varias experiencias, una de ellas fue una depuradora de aguas residuales municipales en la localidad de Zaragozano de Fabara, con 1.300 habitantes, que se finalizó en 2006 y que hoy en día sigue funcionando satisfactoriamente con cumplimiento de los parámetros de vertido, según la normativa vigente, pues se ha reportado el ingreso de entre 126 y 184 mg/L de sólidos en suspensión (SS), con un valor medio afluente de este parámetro de 147 mg/L, generando un efluente entre 8 y 18 mg/L de SS, con un valor medio de 12 mg/L, durante el año 2019, lo que se traduce eficiencias de entre 90,2 a 93,9 %, media de 91,8% de remoción de SS. Todo esto, en cuatro caracterizaciones reportadas. De igual modo se reportó DQO afluente entre 332 y 424 mg/L (media de 368 mg/L), y en el efluente de entre 44 y 123 mg/L (media de 92 mg/L), lo que se traduce en eficiencias de entre 65,2 y 87,9 % (media de 75%) de remoción. Así mismo, se reportó DBO afluente entre 125 y 195 mg/L (media de 154 mg/L), y en el efluente de entre 10 y 25 mg/L (media de 20 mg/L), lo que se traduce en eficiencias de entre 82,7 y 92 % (media de 87%) de remoción. (Ob. Cit).

5.4.5.2.3. Tren de tratamiento: para cualquier EDARU, la línea de agua de partida propuesta siempre incluirá un pretratamiento convencional, una fase anaerobia (que puede ser una Balsa Digestora con Tamiz de Helófitas (DTH) u otro sistema de similar eficacia), Balsas Aerobias Tamiz de Helófitas (ATH) y Balsas Clarificadoras Tamiz de Helófitas (CTH). Introduciendo en el modelo los datos de partida del agua residual y las condiciones climáticas propias de la zona donde se vaya a implantar el tratamiento, se puede obtener el número de balsas de cada tipo con sus dimensiones (ancho, largo y profundidad) de forma robusta y fiable. Con un pre-diseño inicial de balsas adaptándose a la orografía, el modelo permite obtener el grado de cumplimiento. De esa forma, se pre-diseña la EDAR atendiendo a la superficie disponible y topografía del terreno, asegurando el correcto funcionamiento, que determina la viabilidad del proceso si su factibilidad. (Quarq Enterprise S.A., s.f.)

La EFAR se ilustra en las siguientes figuras:

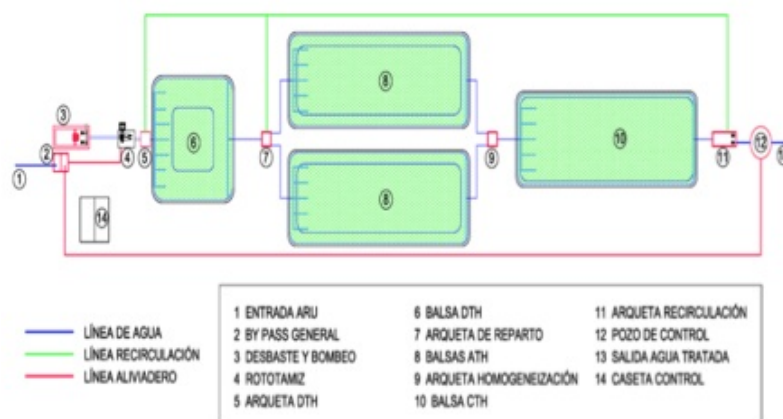
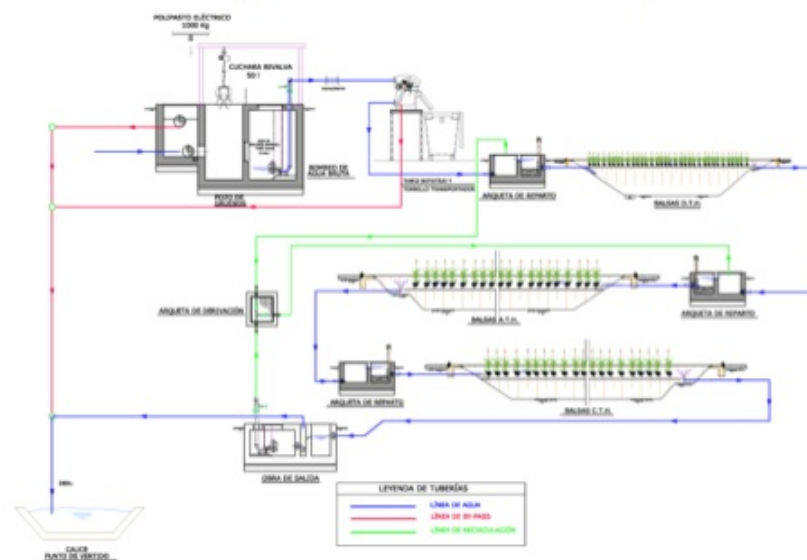


Figura 5-28. Esquema de la EFAR experimental de Filtro Flotante de Helófitas de Quarq Enterprise S.A. y ACUAES, en el Ayuntamiento de Badajoz. Fuente: Quarq Enterprise S.A. (s.f.)

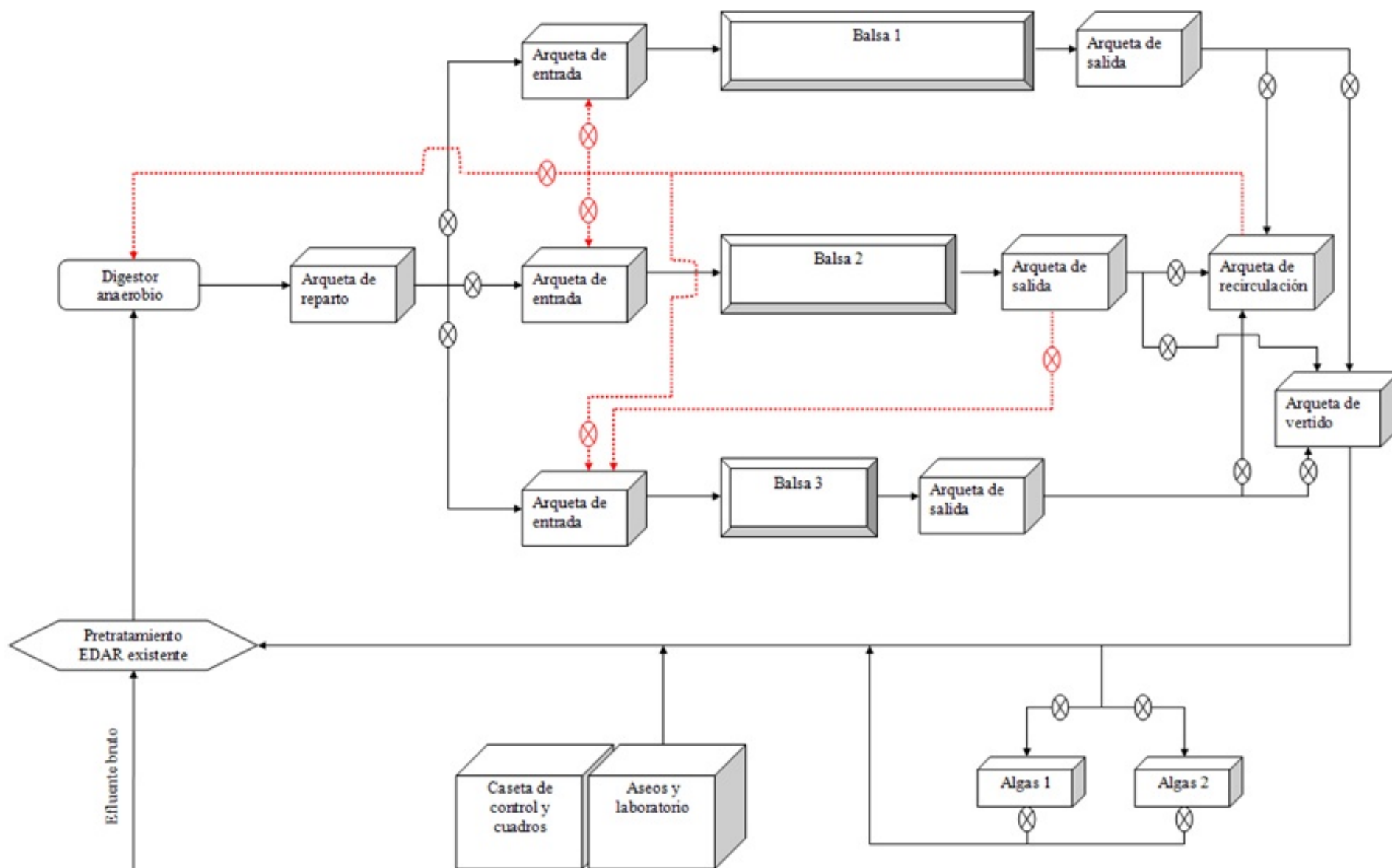


Figura 5-29. Diagrama de flujo de la EFAR experimental de Filtro Flotante de Helófitas de Quarq Enterprise S.A. y ACUAES, en el Ayuntamiento de Badajoz. Fuente: Quarq Enterprise S.A. (s.f.)

Simplificando el tren de tratamiento, es como se muestra en la siguiente figura:

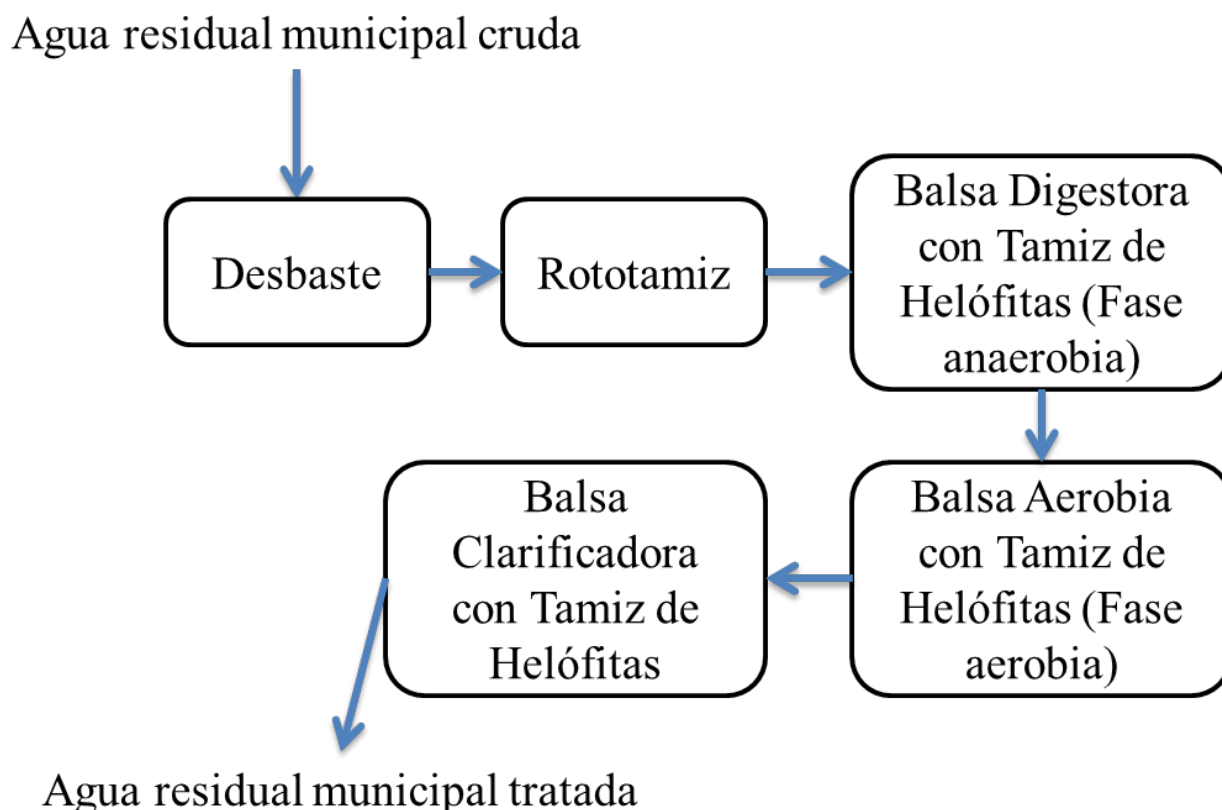


Figura 5-30. Simplificación del tren de tratamiento de la EFAR experimental de Filtro Flotante de Helófitas de Quarq Enterprise S.A. y ACUAES, en el Ayuntamiento de Badajoz.

Por su parte, la empresa Hidrolution también presenta un esquema de este tipo de tratamiento que se aprecia a continuación:



Figura 5-31. FILTRO DE MACROFITAS EN FLOTACIÓN HIDROLUTION FMF®. Fuente: <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/filtro-de-macrofitas-en-flotacion-hidrolution-fmf-la-depuracion-que-se-adapta-al-ento-Xczs3>.

Se aprecia en la figura anterior un tren de tratamiento similar al antes descrito. Por otro lado, JOCA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, S.A. y URBAJA PROMOCIONES Y CONSTRUCCIONES, (2009, MEMORIA, p. 8) desarrollaron un proyecto de EFAR con macrofitas que en resumen está compuesto por las siguientes unidades de tratamiento:

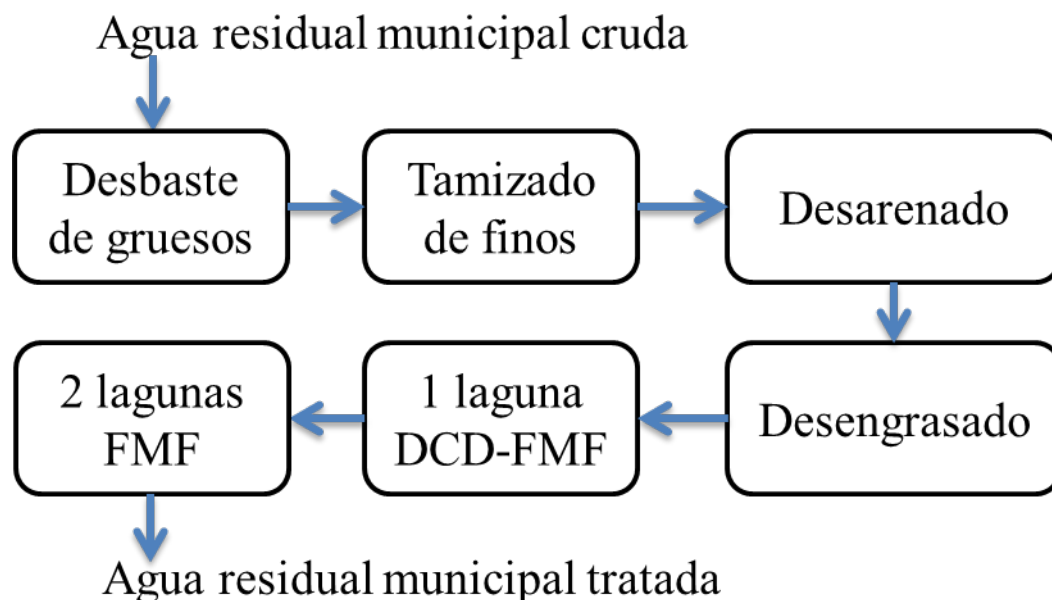


Figura 5-32. Simplificación del tren de tratamiento de la EFAR de macrofitas propuesta por JOCA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, S.A. y URBAJA PROMOCIONES Y CONSTRUCCIONES, (2009, MEMORIA, p. 8).

Como se aprecia, este tren de tratamiento presenta un pretratamiento más amplio y también consta de tres balsas o en este caso lagunas, ya se comentó en los parámetros de diseño que la laguna DCD-FMF o decantación-digestión con macrofitas debe poseer una altura de líquido de 3,5 m, lo que la hace anaerobia y decantativa a la vez, y dos lagunas FMF o laguna con macrofitas o filtro de macrofitas en flotación en paralelo, que deben tener, cada una, una altura de líquido de 1,5 m, lo que la hace aerobia. Por lo que guarda relación con el tratamiento sugerido por Quarq Enterprise S.A. y ACUAES, y por HIDROLUTION FMF®, sin embargo, en JOCA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, S.A. y URBAJA PROMOCIONES Y CONSTRUCCIONES (2009) se pueden apreciar más detalles de los parámetros de diseño, lo que convierte a esta fuente en la más útil para prediseñar la EFAR FFH. Por todo esto, el tren de tratamiento seleccionado para dicha EFAR es el siguiente:

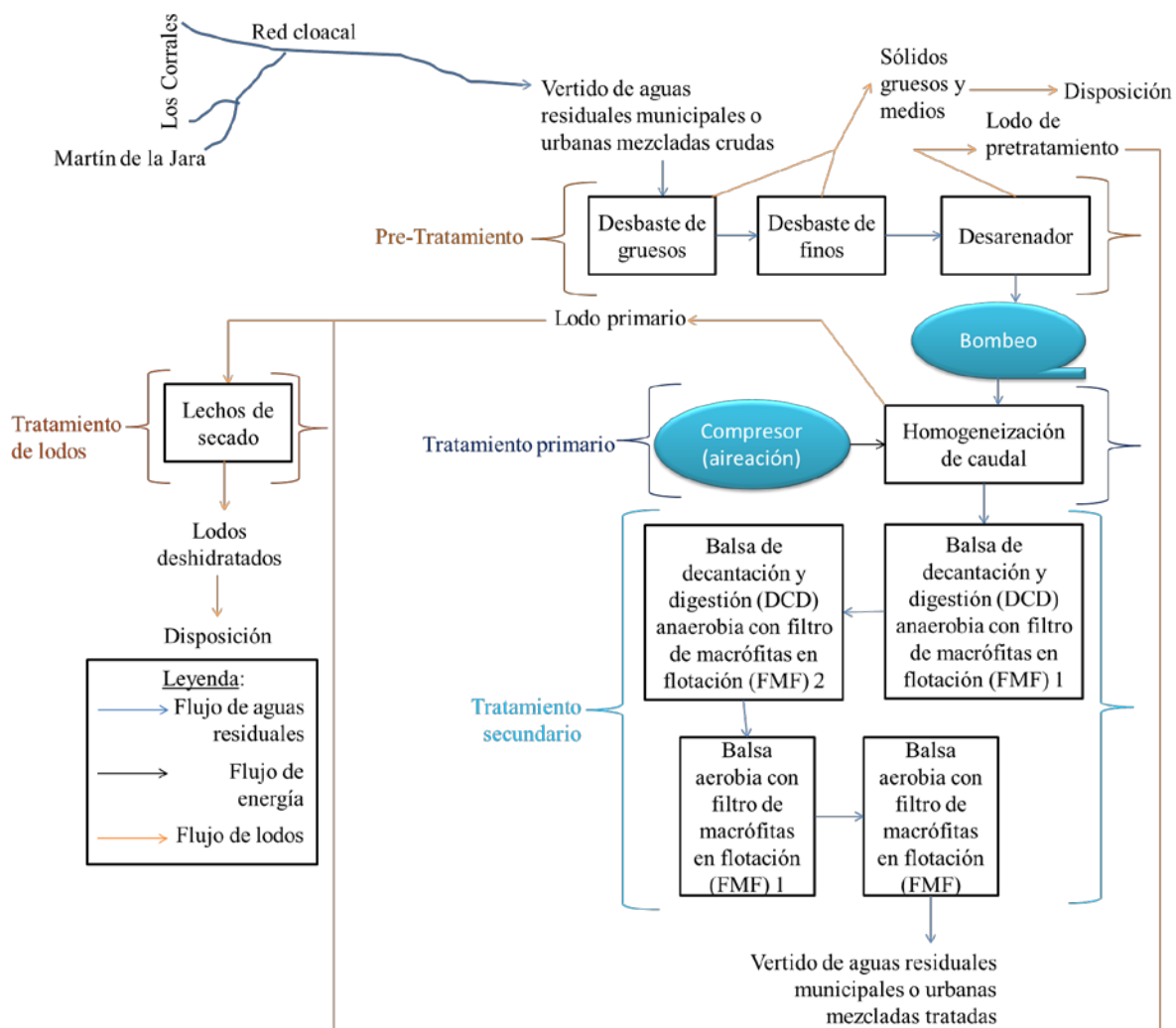


Figura 5-33. Diagrama de flujo de la EFAR FFH seleccionada para Martín de la Jara y Los Corrales.

Como se aprecia, se consideró un pre-tratamiento igual que en el caso de la EDAR de biodiscos, pero en el caso del tratamiento primario, solo se incorporó la homogeneización, ya que aporta el caudal medio constante para que las ya voluminosas balsas de por sí, no lo sean tanto, además que regula la carga orgánica y con la aireación se induce flotación de grasas y espumas, por lo que ocurre el desengrasado antes de las balsas, lo que es deseable para un buen tratamiento biológico. El tratamiento biológico consta de no una sino dos balsas DCD FMF y dos balsas FMF en pero no en paralelo sino en seri, esto, dado que el balance de remoción demostró que esta configuración es la que consigue la remoción deseada de DBO, como más adelante se verá. No se requiere tratamiento de cloración y los lodos son autoconsumidos dentro de las balsas, por lo que se simplifica el tratamiento de lodos de la EFAR, ya que solo requieren ser dispuestos los lodos del pre-tratamiento y las grasas y espumas flotantes del homogeneizador (lodo primario), todos estos lodos pueden ser sometidos a una simple deshidratación en lecho de secado.

5.4.5.3. Pre-Diseño de la EFAR FFH

Como dato fundamental de partida para los cálculos está el caudal, y como previo a las balsas habrá homogeneización, se emplea como caudal de diseño el caudal medio futuro (para el año 2030) que es: $Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d} = 25,5 \text{ L/s} = 0,0255 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.4.5.3.1. Pre-diseño de las balsas DCD-FMF en serie: se inicia con el pre-diseño de las balsas DCD-FMF en serie, entre los parámetros considerados y cálculos, están los siguientes:

Balsas DCD-FMF:

- N° de balsas: 2 en serie
- $Q(\text{diseño}) = Q(\text{medio}) = Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$
- De aquí en adelante, los cálculos se presentan para cada balsa:
- $\text{TRH} = 2,853 \text{ d}$
- Volumen de agua en la balsa: $V(\text{agua}) = Q \cdot \text{TRH} = (2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}) \times (2,853 \text{ d}) = 6.283,5 \text{ m}^3$
- $h_l = 3,5 \text{ m}$
- Área de planta del agua en la balsa: $A(\text{agua}) = V(\text{agua})/h_l = (6.283,5 \text{ m}^3)/(3,5 \text{ m}) = 1.795,29 \text{ m}^2$
- $A(\text{agua}) = L(\text{agua}) \cdot W(\text{agua})$
- $L(\text{agua}) = 1,833 \times W(\text{agua})$, sustituyendo esta expresión en la anterior se obtiene que:
- $A(\text{agua}) = 1,833 \times W(\text{agua})^2$, despejando: $W(\text{agua}) = \sqrt{A(\text{agua})/1,833} = \sqrt{1.795,29/1,833} = 31,3 \text{ m}$
- Retomando, como $L(\text{agua}) = 1,833 \times W(\text{agua}) = 1,833 \times 31,3 = 57,37 \text{ m}$
- Como: $L(\text{agua}) = 0,9607 \times L(\text{superior})$, despejando: $L(\text{superior}) = L(\text{agua})/0,9607 = 57,37/0,9607 = 59,7 \text{ m}$
- Como: $W(\text{agua}) = 0,9302 \times W(\text{superior})$, despejando: $W(\text{superior}) = W(\text{agua})/0,9302 = 31,3/0,9302 = 33,65 \text{ m}$
- Finalmente se comprueba que se cumpla que: $L(\text{superior}) = 1,833 \times W(\text{superior}) = 1,833 \times 33,65 = 61,68 \text{ m}$, sin embargo, el calculo anterior era de $L(\text{superior}) = 59,7 \text{ m}$, por lo que existe una diferencia pequeña de casi 2 m, así que se adopta el valor mayor de: $L(\text{superior}) = 61,7 \text{ m}$.
- Se usará un $\text{BL} = 30 \text{ cm}$
- $L(\text{inferior}) = 0,523 \times L(\text{superior}) = 0,523 \times 61,7 = 32,27 \text{ m}$
- $W(\text{inferior}) = 0,1163 \times W(\text{superior}) = 0,1163 \times 33,65 = 3,91 \text{ m}$
- N° de plantas = $(20 \text{ plantas}/\text{m}^2) \times (1.795,29 \text{ m}^2) = 35.906 \text{ plantas}$
- $A(\text{planta})_{\text{tot}} = L(\text{superior}) \times W(\text{superior}) = 61,7 \times 33,65 = 2.076,21 \text{ m}^2$

El esquema de una de las dos balsas DCD-FMF pre-diseñada se muestra a continuación:

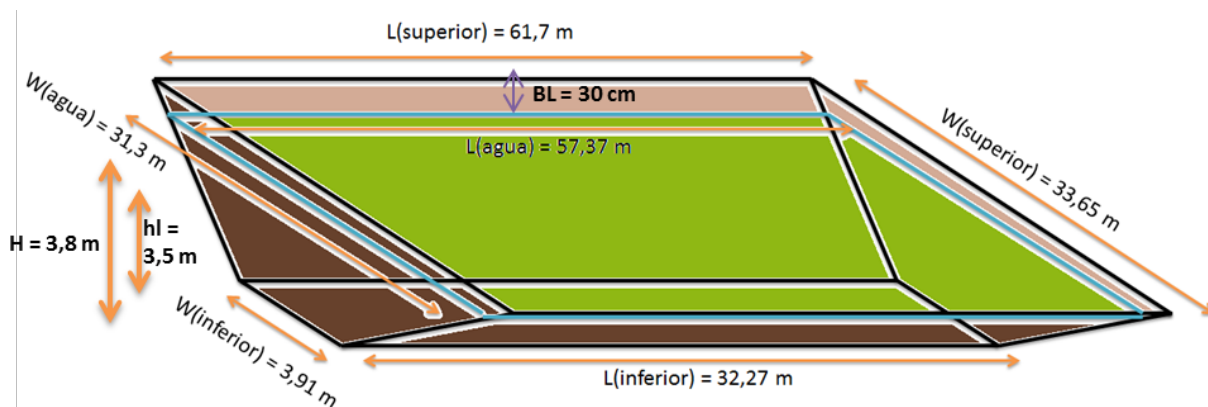


Figura 5-34. Esquema de una de las dos balsas DCD-FMF en serie pre-diseñada.

5.4.5.3.2. Pre-diseño de las balsas FMF en serie:

- N° de balsas: 2 en serie
 - $Q = 2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}$
 - De aquí en adelante cada calculo es para cada balsa FMF individual
 - $\text{TRH} = 3,013 \text{ d}$
 - Volumen de agua en cada balsa: $V(\text{agua}) = Q \cdot \text{TRH} = (2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}) \times (3,013 \text{ d}) = 6.635,89 \text{ m}^3$
 - $h_l = 1,5 \text{ m}$
 - Área de planta del agua en cada balsa: $A(\text{agua}) = V(\text{agua})/h_l = (6.635,89 \text{ m}^3)/(1,5 \text{ m}) = 4.423,93 \text{ m}^2$
 - $A(\text{agua}) = L(\text{agua}) \cdot W(\text{agua})$
 - $L(\text{agua}) = 2,75 \times W(\text{agua})$, sustituyendo esta expresión en la anterior, se obtiene lo siguiente:
 - $A(\text{agua}) = 2,75 \times W(\text{agua})^2$, despejando: $W(\text{agua}) = \sqrt{A(\text{agua})/2,75} = \sqrt{4.423,93/2,75} = 40,11 \text{ m}$
 - $L(\text{agua}) = 2,75 \times W(\text{agua}) = 2,75 \times 40,11 = 110,3 \text{ m}$
 - $L(\text{agua}) = 0,9735 \times L(\text{superior})$, entonces: $L(\text{superior}) = L(\text{agua})/0,9735 = 110,3/0,9735 = 113,3 \text{ m}$
 - $W(\text{agua}) = 0,9302 \times W(\text{superior})$, entonces: $W(\text{superior}) = W(\text{agua})/0,9302 = 40,11/0,9302 = 43,12 \text{ m}$
 - Se comprueba esta relación: $L(\text{superior}) = 2,63 \times W(\text{superior}) = 2,63 \times 43,12 = 113,4 \text{ m}$, sin embargo el calculo anterior dio: $L(\text{superior}) = 113,3 \text{ m}$, por lo que la diferencia es muy pequeña. Se adopta el valor mayor como: $L(\text{superior}) = 113,4 \text{ m}$.
 - $\text{BL} = 30 \text{ cm}$
 - $L(\text{inferior}) = 0,8407 \times L(\text{superior}) = 0,8407 \times 113,4 = 95,34 \text{ m}$
 - $W(\text{inferior}) = 0,5814 \times W(\text{superior}) = 0,5814 \times 43,12 = 25,07 \text{ m}$
 - N° de plantas = $(10 \text{ plantas}/\text{m}^2) \times (4.423,93 \text{ m}^2) = 44.239,3 \text{ plantas}$
 - $A(\text{planta}) = L(\text{superior}) \times W(\text{superior}) = (113,4) \times (43,12) = 4.889,81 \text{ m}^2$
- El esquema de una de las dos balsas FMF pre-diseñada se muestra a continuación:

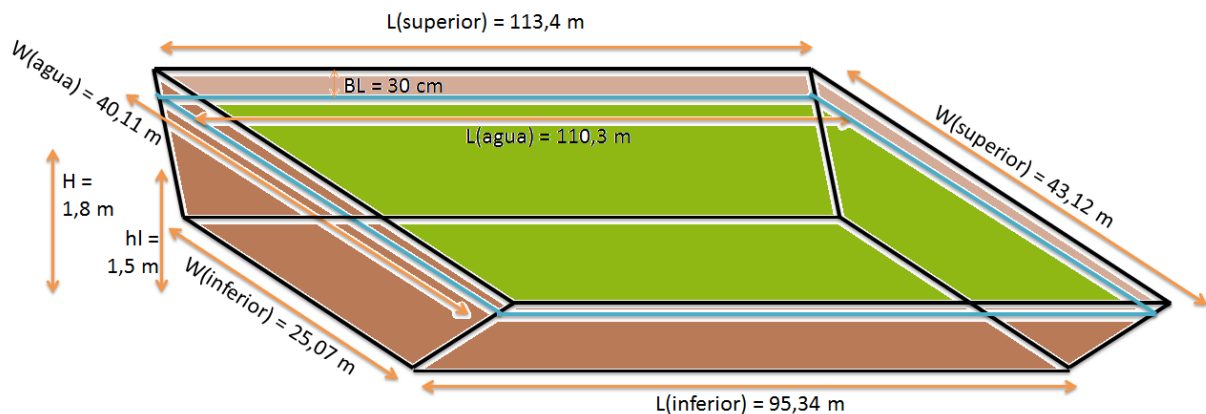


Figura 5-35. Esquema de una de las dos balsas FMF en serie pre-diseñada.

5.4.5.4. Balances de Remoción de Contaminantes en la EFAR FFH

Se parte de las tasas de remoción de DBO consideradas en los parámetros de diseño y que se vuelven a mencionar a continuación:

- Remoción en la balsa DCD-FMF: $(80 \text{ g(DBO)}/\text{m}^2 \cdot \text{d}) \times [A(\text{agua})\text{DCD-FMF}] = (80) \times (1.795,29) = 143.623,20 \text{ g(DBO)}/\text{d} = \text{Carga(DBO)removidaDCD-FMF}$
- Remoción en las balsas FMF: $(50 \text{ g(DBO)}/\text{m}^2 \cdot \text{d}) \times [A(\text{agua})\text{FMF}] = (50) \times (4.423,93) = 221.196,38 \text{ g(DBO)}/\text{d} = \text{Carga(DBO)removidaFMF}$

Por lo que previamente se debe determinar la DBO con la que llega el agua residual a las balsas, así:

Tabla 5-11. Balance de remoción de DBO en la EFAR FFH, desde el agua residual cruda hasta el ingreso a la balsa DCD-FMF.

<i>DBO entrante (mg/L)</i>	<i>Unidad de tratamiento</i>	<i>% de remoción de DBO</i>	<i>DBO saliente (mg/L)**</i>
360*	Desbaste de sólidos gruesos y finos	Para cribado fino, entre 5 y 10 %. Se selecciona 10% (dado que además de la remoción de finos, también habrá remoción de gruesos)	324
324	Desarenador	Entre 0 y 5 %. Se selecciona 3% (un valor cercano al promedio)	314,28
314,28	Homogeneización de caudal y carga	0% (la literatura no reporta un % de remoción, a pesar que la aireación podría remover parte de la DBO)	314,28 ≈ 314,3

Notas: *(valor tomado de la figura 5-8, para un escenario futuro para el año 2030), **[DBO saliente = (DBO entrante) × {1 - (%remoción/100%)}].

Como se aprecia en la tabla anterior, a la salida de la homogeneización el agua ingresará a la primera balsa DCD-FMF con una DBO de 314,3 mg/L (g/m³), por lo que la carga de DBO inicial de la balsa DCD-FMF es:

$$\text{Carga(DBO)}_{\text{entraDCD-FMF1}} = 314,3 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \times 2.202,42 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} = 692.220,61 \text{ g(DBO)}/\text{d}$$

El balance básico a aplicar es: $\text{Carga(DBO)}_{\text{sale}} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entra}} - \text{Carga(DBO)}_{\text{removida}}$

Aplicando dicho balance en las balsas DCD-FMF:

$$\text{Carga(DBO)}_{\text{saleDCD-FMF1}} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entraDCD-FMF1}} - \text{Carga(DBO)}_{\text{removidaDCD-FMF1}} = (692.220,61 - 143.623,20) \text{ g(DBO)}/\text{d} = 548.597,41 \text{ g(DBO)}/\text{d} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entraDCD-FMF2}}$$

$$\text{Carga(DBO)}_{\text{saleDCD-FMF2}} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entraDCD-FMF2}} - \text{Carga(DBO)}_{\text{removidaDCD-FMF2}} = (548.597,41 - 143.623,20) \text{ g(DBO)}/\text{d} = 404.974,21 \text{ g(DBO)}/\text{d} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entraFMF1}}$$

Aplicando dicho balance en las balsas FMF:

$$\text{Carga(DBO)}_{\text{saleFMF1}} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entraFMF1}} - \text{Carga(DBO)}_{\text{removidaFMF1}} = (404.974,21 - 221.196,38) \text{ g(DBO)}/\text{d} = 138.777,83 \text{ g(DBO)}/\text{d} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entraFMF2}}$$

Sin embargo, verificando que realmente es necesaria una segunda balsa en serie del tipo FMF, se realiza el siguiente cálculo:

$[138.777,83 \text{ g(DBO)}/\text{d}] / (2.202,42 \text{ m}^3/\text{d}) = 63 \text{ g}/\text{m}^3 = 63 \text{ mg/L} > 35 \text{ mg/L}$ (límite legalmente permitido), como se aprecia, con las tres primeras balsas aun no se consigue que la DBO este por debajo del límite legalmente establecido, por lo que efectivamente se requiere usar la cuarta balsa, es decir la balsa FMF 2.

$$\text{Carga(DBO)}_{\text{saleFMF2}} = \text{Carga(DBO)}_{\text{entraFMF2}} - \text{Carga(DBO)}_{\text{removidaFMF2}} = (138.777,83 - 221.196,38) \text{ g(DBO)}/\text{d} = -82.418,55 \text{ g(DBO)}/\text{d} = 0$$

Por lo tanto, la DBO de salida se espera que sea nula.

Con respecto al resto de contaminantes, deben ser considerados en el balance de remoción de contaminantes, para lo cual, recordando lo antes mencionado en el punto “5.4.5.2.2. Rendimiento del tratamiento” se aprecia que en la EFAR FFH de Zaragoza de Fabara en el año 2019 se consiguió una remoción promedio del 91,8% de los SS y del 75% de la DQO. Para el caso de la remoción de nitrógeno y fósforo, se toma el proceso de lagunas anaerobias para el caso de las balsas DCD-FMF, que remueven 20 y 4 mg/L respectivamente; y para las balsas FMF se toma el proceso de laguna facultativa, que posee la misma tasa de remoción, de acuerdo con la tabla 5.2 (Romero, 2008, p. 141). El balance de remoción se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 5-12. Balance de Remoción de Contaminantes en la EFAR FFH.

<i>Parámetros (unidades)</i>	<i>Valores en el agua residual cruda</i>	<i>Desbaste de sólidos gruesos y finos</i>		<i>Desarenador</i>		<i>Dos balsas DCD-FMF en serie</i>		<i>Dos balsas FMF en serie</i>		<i>Cumplimiento con los valores de vertido legalmente establecidos</i>	
		<i>% de remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>% de remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>Remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>Remoción</i>	<i>Valores del efluente</i>	<i>Valores de vertido permitidos</i>	<i>¿Cumple?</i>
SS (mg/L)	317	(2-20): 20	253,6	(0-10): 5	240,9	(91,8%)*	-	(91,8%)*	19,75	40	Si
DBO _{5,20} (mg/L)	360	(5-10): 10	324	(0-5): 3	314,3	(100%)**		(100%)**	0	35	Si
DQO (mg/L)	658	(5-10): 10	592,2	(0-5): 3	574,4	(75%***)		(75%***)	143,6	130	No
N (mg/L)	33,5	-	33,5	-	33,5	(20 mg/L)x2	0	(20 mg/L)x2	0	18	Si
P (mg/L)	6,1	-	6,1	-	6,1	(4 mg/L)x2	0	(4 mg/L)x2	0	3	Si

Notas: *(% de remoción de SS total del proceso de balsas con FFH), ***(según el balance de remoción de DBO antes realizado), ***(% de remoción de DQO total del proceso de balsas con FFH). No se incluyo en esta tabla la unidad de homogeneización, dado que no se reportan porcentajes de remoción de los parámetros considerados en esa unidad de tratamiento.

Se aprecia que las EFAR FFH es eficiente para la remoción de contaminantes y para la producción de un vertido legalmente permitido. El único parámetro que parece no cumplir con el límite de vertido es la DQO, sin embargo, el 75% de remoción de este valor fue considerado para una EFAR FFH con tres balsas y la propuesta tiene cuatro balsas, por lo tanto, si es posible que se cumpla con este parámetro también.

5.4.5.5. Costos de las EFAR FFH

5.4.5.5.1. Costos de la Adquisición del Terreno para la EFAR FFH: en el siguiente cuadro se realiza una serie de cálculos muy básicos que permiten estimar el área total de la EFAR FFH, tomando información de la bibliografía especializada, y considerando que las unidades preliminares a la homogeneización y ella misma, se diseñan a partir del caudal punta ($4.404,84 \text{ m}^3/\text{d} = 51 \text{ L/s} = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}$), mientras que las unidades ubicadas después de la homogeneización, incluyendo los tratamientos de lodos, se diseñan a partir del caudal homogeneizado o medio ($2.202,42 \text{ m}^3/\text{d} = 25,5 \text{ L/s} = 0,0255 \text{ m}^3/\text{s}$):

Tabla 5-13. Estimación del Área de EFAR FFH.

Unidades	Calculo del área de plantas	Datos	Resultado
Desbaste de gruesos y finos	$A_{\text{secc}} = Q/v$	$Q = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}$ $v = 0,6 \text{ m/s}$ (Romero, 2008, p. 288)	$A = 0,085 \text{ m}^2$
	$A = hl.W$	$hl = W$ (juicio del proyectista)	$W = 0,292 \text{ m}$
	$L(\text{rejas}) = hl/\text{sen}(\theta)$	$\theta = 60^\circ$ (Romero, 2008, p. 288)	$L(\text{rejas}) = 0,34 \text{ m}$
	$\frac{\text{Cos}(\theta)}{L(\text{horizontal})/L(\text{rejas})} =$	$\theta = 60^\circ$ (Romero, 2008, p. 288)	$L(\text{horizontal}) = 0,17 \text{ m}$
	$L(\text{canal}) = L(\text{horizontal}) \times 5$	A juicio del proyectista (suponiendo 2 rejas en serie, con los espaciados correspondientes)	$L(\text{canal}) = 0,842 \text{ m}$
	$A(\text{planta}) = W \times L(\text{canal})$	-	$A(\text{planta}) = 0,25 \text{ m}^2$
Desarenador	25 m de largo y 1,8 m de ancho (área de planta de 45 m^2) para un $Q_{\text{máx}} = 1,32 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{máx}} = 0,051 \text{ m}^3/\text{s}$	$A(\text{planta}) = 1,74 \text{ m}^2$
Homogeneizador	$V_{\text{neto}} = Q \cdot \text{TRH}$ $A_{\text{neta}}(\text{planta}) = V_{\text{neto}}/hl$	TRH: 12 – 24 h = 24 h. $H = 4,5 \text{ m}$. Borde libre (BL) = 0,9 m. (Romero, 2008, p. 316) $hl = H - \text{BL} = 3,6 \text{ m}$ $Q = 4.404,84 \text{ m}^3/\text{d}$	$V_{\text{neto}} = 4.404,84 \text{ m}^3$ $A_{\text{neta}}(\text{planta}) = 1.223,57 \text{ m}^2$
2 Balsas DCD-FMF	$2x[A(\text{planta})c/u]$	$A(\text{planta})c/u = 2.076,21 \text{ m}^2$	$A(\text{planta}) = 4.152,42 \text{ m}^2$
2 Balsas FMF	$2x[A(\text{planta})c/u]$	$A(\text{planta})c/u = 4.889,81 \text{ m}^2$	$A(\text{planta}) = 9.779,62 \text{ m}^2$
Lechos de secado de lodos	$A(\text{planta}) = (A/c) \cdot c$	Para lodo primario y secundario se puede adoptar el valor de: $A/c = 0,2 \text{ m}^2/\text{hab}$ (Romero, 2008, p. 833) Población conjunta esperada para Martín de la Jara y Los Corrales en 2030 = 10.011 hab = c	$A(\text{planta}) = 2.002,2 \text{ m}^2$
A(planta) total			$\Sigma A(\text{planta}) = 17.159,80 \text{ m}^2$

Como se aprecia, el área antes calculada es neta, pero si se suman espaciados entre unidades de tratamiento, y construcciones adicionales (oficinas, baños, estacionamiento, etc.), siendo conservador, se puede adoptar un área total de la EFAR FFH de $20.000,00 \text{ m}^2$. El costo promedio del terreno en Sevilla, España es de: 333,93 Euros/ m^2 , de acuerdo con la consulta y promedio de los 16 primeros datos apreciados en la página web <https://www.idealista.com/venta-terrenos/sevilla-provincia/> (accedido: 15 de noviembre de 2020), donde se calculó cada tasa dividiendo el costo total de cada terreno (en su mayoría parcelas y solares urbanos) en Euros entre su área en m^2 , y se observaron valores que oscilaron entre 26,65 y 1.308,14 Euros/ m^2 , con cuatro valores

menores a 100 Euros/m², y dos valores superiores a 1.000 Euros/m², lo que depende de la zona donde se ubica el terreno y las mejoras en el mismo. Aplicando el costo promedio:

$$\text{Costo del terreno} = (20.000,00 \text{ m}^2) \times \left(\frac{333,93 \text{ Euros}}{\text{m}^2} \right) = 6.678.600,00 \text{ Euros}$$

5.4.5.5.2. Costos de Construcción

Se presentan en la siguiente tabla, con base en ecuaciones mostradas por Romero (2008) para este fin (p. 166), que genera valores en dólares del año 1978, con base en el caudal de diseño en m³/d, que es de 4.404,84 m³/d para la unidad de homogeneización y sus unidades preliminares, y de 2.202,42 m³/d para las unidades posteriores a homogeneización. De acuerdo con la página web Dinero en el Tiempo (2020) la tasa de inflación promedio de Estados Unidos entre los años 1978 y 2020 ha sido del 3,44% anual, por lo que en total, la moneda presentó un aumento del 313,81% entre estos años; esto quiere decir que 1 dólar (USD) de 1978 equivale a 4,14 dólares de 2020.

Tabla 5-14. Costos de Construcción de las EFAR FFH.

<i>Unidades</i>	<i>Proceso</i>	<i>Ecuaciones de costos</i>	<i>Costos (USD)</i>	
			<i>1978</i>	<i>2020</i>
Desbaste	Tratamiento preliminar	$123.Q^{0,76}$	72.325,6	299.427,98
Desarenador			72.325,6	299.427,98
Homogeneización	Igualamiento	$482.Q^{0,60}$	74.029,55	306.482,34
2 Balsas DCD-FMF	Lagunas de estabilización	$2x(2.836.Q^{0,67})$	985.097,73	4.078.304,6
2 Balsas FMF	Lagunas aireadas	$2x(1.024.Q^{0,79})$	895.820,64	3.708.697,45
Bombeo	Bombeo del afluente	$730.Q^{0,63}$	144.211,15	597.034,16
Lechos de secado	Lechos de secado	$170.Q^{0,73}$	46.856,09	193.984,21
Vertido del agua tratada	Emisario del efluente sobre aguas superficiales	$107.Q^{0,77}$	40.125,17	166.118,20
Edificio de mantenimiento y laboratorio	Edificio de mantenimiento y laboratorio	$1.623.Q^{0,58}$	140.994,00	583.715,16
Total			10.233.192,08	

Expresando estos costos en Euros (1 USD = 0,84 Euros), la EFAR FFH de Martín de la Jara y Los Corrales costará en construirla: 8.595.881,35 Euros.

5.4.5.5.3. Costos de Operación y Mantenimiento

Los costos anuales totales de operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento, según estudios de la USEPA, se calculan a continuación, con base en ecuaciones basadas en el caudal en m³/d, que es de 4.404,84 m³/d para la unidad de homogeneización y sus unidades preliminares (en este caso para el tratamiento primario), y de 2.202,42 m³/d para las unidades posteriores a la homogeneización (en este caso para el tratamiento secundario y otros tratamientos). Estas ecuaciones generan los costos basados en dólares del año 1977 (Romero, 2008, p. 169), y de acuerdo con Dinero en el Tiempo 2 (2020) la tasa de inflación promedio de Estados Unidos entre los años 1977 y 2020 ha sido del 3,51% anual, por lo que en total, la moneda presentó un aumento del 341,54% entre estos años, lo que quiere decir que 1 dólar (USD) de 1977 equivale a 4,42 dólares de 2020.

Tabla 5-15. Costos de Operación y Mantenimiento de las EFAR FFH.

Tratamientos	Ecuaciones de costos	Costos (USD)			
		1977	Factor de mayoración	1977 total	2020
Tratamiento 1rio	11,02.Q ^{1,01}	52.789,92	4	211.159,68	933.325,79
Tratamiento 2rio	26,07.Q ^{0,94}	36.179,88	4	144.719,53	639.660,34
Total					1.572.986,13

Nota: el factor de mayoración depende del número de unidades que cumplen con ese tipo de tratamiento, por ejemplo, en cuanto al tratamiento secundario, son cuatro balsas.

Expresando estos costos en Euros (1 USD = 0,84 Euros), la EFAR FFH conjunta de Martín de la Jara y Los Corrales, costará en mantenerla anualmente: 1.321.308,35 Euros.

5.4.5.6. Ingresos y Egresos Generales de la EFAR FFH por Etapa de su Ciclo de Vida

Previo determinar esto es necesario estimar previamente: el consumo de energía, las emisiones de GEI y la generación de lodos:

5.4.5.6.1. Consumo de energía:

- En el bombeo: se consume la misma energía de bombeo que la calculada para la EDAR de biodiscos, ya que el diseño del tanque de homogeneización es el mismo, y el caudal también es igual, el resultado de ese cálculo fue de 2,7 HP = 2 kW = 2 kJ/s = 174 MJ/d teóricos. Suponiendo una eficiencia de 70% de la bomba, se consumen: 248,4 MJ/d reales = 90.666,00 MJ/año
- En el compresor de la mezcla neumática del tratamiento de homogeneización se consume energía, que también fue calculada previamente para la EDAR de biodiscos, en este caso es la misma, de: 15.416,94 W = 15,42 kW = 15,42 kJ/s = 1.332,02 MJ/d = 486.187,3 MJ/año teóricos. Para una eficiencia del compresor del 70%, el valor real es de: 694.553,29 MJ/año reales.
- Sumando: el consumo energético total de la EFAR FFH solo por tratamiento del agua es de 785.219,29 MJ/año.

5.4.5.6.2. Emisiones de GEI:

5.4.5.6.2.1. GEI emitidos directamente por el tratamiento de las aguas residuales en la EFAR FFH:

5.4.5.6.2.1.1. Emisiones de CH₄ en la EFAR FFH:

Se aplica la misma ecuación antes usada para esto, que se vuelve a mostrar a continuación:

$$\text{Emisión de CH}_4 = [(TOW - S) \cdot EF - R] \times 10^{-3}$$

Ecuación 7

Donde: TOW $\equiv$ kg(DBO)/año

S = DBO eliminada al lodo $\equiv$ kg(DBO)/año

EF = Factor de emisión $\equiv$ kg(CH₄)/kg(DBO)

R = Cantidad de CH₄ recuperada al año $\equiv$ kg(CH₄)/año

Por su parte:

$$TOW = P \cdot DBO \cdot I \cdot 365$$

Ecuación 8

Donde: P = población

DBO = DBO per cápita (g/hab.d)

I = factor de corrección para la BOD industrial adicional vertida en el desagüe. En ausencia de la opinión de expertos, una ciudad puede aplicar el valor predeterminado de 1,25 para la recogida de aguas residuales, y 1,00 para las no reguladas

Otra ecuación a usar es:

$$EF = B_0 \cdot MCF \cdot U \cdot T_j$$

Ecuación 9

Donde: B₀ = capacidad máxima de producción de CH₄. Entrada del usuario o valor predeterminado: 0,6 kg(CH₄)/kg(DBO)

MCF = factor (fracción) de corrección de metano

U = Fracción de la población en el grupo de ingreso en el año de inventario

Tj = Grado de utilización (relación) del sistema o vía de tratamiento/descarga, j, para cada fracción de grupo de ingreso en el año de inventario

Se inicia con el empleo de la ecuación 9, donde se usará $B_0 = 0,6$. El valor de MFC se lee de la figura 5-25 antes mostrada, donde el "tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación" considerada fueron "laguna anaeróbica poco profunda", para el caso de las balsas FMF, ya que tienen "profundidad de menos de dos metros..." y su MFC típico es de 0,2. También se consideró las "laguna anaeróbica profunda" para el caso de las balsas DCD-MFM, ya que poseen una "profundidad de más de dos metros", con un valor de MFC típico de 0,8. Puesto que habrán dos balsas DCD-FMF y dos FMF, se toma un valor promedio de MFC de 0,5. Por su parte los valores de U y Tj a usar son los mismos que para el caso de la EDAR de biodiscos, que son: $U = 0,34$ y $T_j = 0,22$. Se sustituyen todos los valores a continuación:

$$EF = B_0 \cdot MCF \cdot U \cdot T_j = 0,6 \times 0,5 \times 0,34 \times 0,22 = 0,02244 \text{ kg}(\text{CH}_4)/\text{kg}(\text{DBO})$$

A continuación se resuelve la ecuación 8, siendo $P = 10.011$ habitantes para el año 2030 y para ambas poblaciones sumadas (Martín de la Jara y Los Corrales), $\text{DBO per cápita} = 79,09 \text{ g}(\text{DBO})/\text{hab.d}$ (como ya se mostró previamente en la figura 5-7), $I = 1,25$ pues se cuenta con el diseño de la red cloacal conjunta, sustituyendo:

$$\text{TOW} = P \cdot \text{DBO} \cdot I \cdot 365 = (10.011) \times (79,09) \times (1,25) \times (365) = 361.245.057,90 \text{ kg}(\text{DBO})/\text{año}$$

Ya es posible emplear la ecuación 7, donde S se calcula previamente así:

$$S = [(\text{DBO}_0 - \text{DBO}_f) \cdot (Q/1.000)] \cdot 365 = [(360 - 0) \cdot (2.202,42/1.000)] \cdot 365 = 289.397,99 \text{ kg}(\text{DBO})/\text{año}$$

Por su parte, $R = 0$ (no se han considerado unidades de recuperación de metano). Sustituyendo:

$$\begin{aligned} \text{Emisión de CH}_4 &= [(TOW - S) \cdot EF - R] \times 10^{-3} \\ &= [(361.245.057,90 - 289.397,99) \times (0,02244) - 0] \times 10^{-3} \\ &= \mathbf{8.099,85 \frac{Tm(CH_4)}{año} \text{ para el año 2030 para la EFAR FFH}} \end{aligned}$$

5.4.5.6.2.1.2. Emisiones de N_2O en la EFAR FFH:

El cálculo se realiza con la misma ecuación de la figura 5-26 antes vista, donde, de hecho, todos los datos a sustituir para la EFAR FFH son los mismos que los de la EDAR de biodiscos, así que se obtiene el mismo resultado:

$$\begin{aligned} \text{Emisiones de N}_2\text{O} &= [(10.011 \times 259,07 \times 0,16 \times 1,4 \times 1,25) - 0] \times 0,005 \times (44/28) \times 10^{-3} = \\ &= \mathbf{5,71 Tm(N_2O)/año \text{ para el año 2030 para la EFAR FFH}} \end{aligned}$$

5.4.5.6.2.1.3. Emisiones de CO_2e en la EFAR FFH:

Para convertir las emisiones de metano a CO_2e se aplica el potencial de calentamiento global (PCG) de este gas, que es de 28, y lo mismo se hace para convertir las emisiones de N_2O a CO_2e , en cuyo caso el PCG es 265; todo esto, como ya se explicó anteriormente para el caso de la EDAR de biodiscos. El cálculo del CO_2e de la EFAR FFH se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Tm}(\text{CO}_2\text{e})/\text{año} &= [\text{Tm}(\text{CH}_4)/\text{año}] \cdot \text{PCG}(\text{CH}_4) + [\text{Tm}(\text{N}_2\text{O})/\text{año}] \cdot \text{PCG}(\text{N}_2\text{O}) \\ \text{Tm}(\text{CO}_2\text{e})/\text{año} &= (8.099,85) \times (28) + (5,71) \times (265) = \mathbf{228.292,99 Tm(CO_2e)/año \text{ para el año 2030 para la EFAR FFH}} \end{aligned}$$

5.4.5.6.2.2. GEI emitidos indirectamente por el uso de máquinas eléctricas en el tratamiento de las aguas residuales en la EFAR FFH:

Ya se calculó previamente que la bomba que alimenta el homogeneizador y el compresor que mezcla el homogeneizador, en conjunto consumirán $785.219,29 \text{ MJ/año}$ ($218.116,47 \text{ kWh/año}$). Para llevar este valor a emisiones de GEI en CO_2e , se multiplica el valor antes mostrado por el factor de emisión que ya se citó previamente cuando se realizó este mismo cálculo para la EDAR de biodiscos, continuación: para el año 2019 las comercializadoras de electricidad sin GdO en España deben emitir un máximo de $0,31 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$. Con este dato se calcula la emisión de CO_2 por consumo eléctrico de las diferentes máquinas de la EFAR FFH, así:

$$\frac{218.116,47 \text{ kWh}}{\text{año}} \times \frac{0,31 \text{ kg CO}_2}{\text{kWh}} = 67.616,11 \text{ kg CO}_2/\text{año}$$

$$= 67,62 \frac{\text{Tm}(\text{CO}_2)}{\text{año}} \text{ por consumo eléctrico de las diferentes maquinas de la EFAR FFH}$$

5.4.5.6.3. Generación de lodos

El valor de interés es el lodo deshidratado que debe disponerse al final del proceso, para ello, hay que conocer las propiedades del lodo, como su porcentaje de humedad, que es: 95% en el lodo primario (Romero, 2008, p. 759). El Lodo primario crudo y húmedo posee 54 g(sólidos secos)/hab.d (ob. Cit., tabla 26.5, p. 775). Notese que no se está considerando el lodo secundario pues a pesar de haber tratamiento secundario en balsas con FFH, estas autodigieren el lodo. Ya se ha mencionado que el tratamiento de lodo consiste en lechos de secado, de este último el lodo se puede retirar cuando tenga entre 30 a 40 % de solidos (ob. Cit., tabla 26.25, p. 833), se selecciona un 35% de sólidos como valor medio, o que tenga 65% de humedad. Con estos datos se puede calcular la producción de lodos, así:

- Lodo primario:

$$\frac{54 \text{ g(sólido seco)}}{\text{hab. d}} \times \frac{365 \text{ d}}{1 \text{ año}} \times 10011 \text{ hab} \times \frac{1 \text{ Tm}}{1000000 \text{ g}} = 197,32 \frac{\text{Tm(sólido seco)}}{\text{año}}$$

$$197,32 \frac{\text{Tm(sólido seco)}}{\text{año}} \times \frac{95 \text{ Tm(agua)}}{5 \text{ Tm(sólido seco)}} = 3749,02 \text{ Tm(agua)/año}$$

- Lodo total deshidratado que debe ser dispuesto de manera apropiada:

$$197,32 \frac{\text{Tm(sólido seco)}}{\text{año}} \times \frac{100\%}{35\%} = 563,77 \frac{\text{Tm(lodo) deshidratado}}{\text{año}}$$

5.4.5.6.4. Ingresos y Egresos Generales de la EFAR FFH por Etapa de su Ciclo de Vida:

Se contabilizan en la siguiente tabla:

Tabla 5-16. Ingresos y Egresos Generales de la EFAR FFH por Etapa de su Ciclo de Vida.

<i>Etapas del ciclo de vida de la EDAR</i>	<i>Procesos</i>	<i>Ingresos</i>	<i>Egresos</i>
Diseño	Actualización del PROYECTO DE CONCENTRACIÓN DE VERTIDOS DE MARTÍN DE LA JARA – LOS CORRALES. (SEVILLA) para incorporar la EFAR FFH	Estudios individuales: por ejemplo, de geología, climatología, hidrología, caracterización, entre otros.	PROYECTO DE DISEÑO DE LA EFAR FFH PARA TRATAR LAS AGUAS RESIDUALES CONCENTRADAS DE MARTÍN DE LA JARA – LOS CORRALES. (SEVILLA)
		Personal: Ingenieros, Técnicos, Analistas, etc.	
Construcción	Ocupación del terreno	Adquisición del terreno de 20.000,00 m ²	Dinero de la compra del terreno que ocupará la EFAR: 6.678.600,00 Euros
	Construcción de la EFAR	Personal para la construcción	Dinero por el cubrimiento de los costos de construcción de la EFAR: 8.595.881,35 Euros.
		Maquinaria de construcción	
Operación y mantenimiento	Operación	Consumo de energía eléctrica total: 785.219,29 MJ/año	Emisiones de GEI totales: 228.360,61 Tm(CO ₂ e)/año
		Consumo de reactivos: 0 (no se tiene previsto emplear ningún reactivo)	Generación de lodos deshidratados a disponer: 563,77 Tm/año
	Mantenimiento	Personal de mantenimiento (y de operación)	Dinero para cubrir los costos anuales por el mantenimiento (y operación) de la EFAR: 1.321.308,35
		Insumos de mantenimiento (y operación)	

			Euros/año
--	--	--	-----------

5.4.6. Comparación Preliminar de la EDAR de Biodiscos y la EFAR FFH

Esta comparación se realiza tomando en cuenta los valores de ingresos y egresos generales de la EDAR y EFAR, por Etapa de su Ciclo de Vida, así como en la eficiencia de cada conjunto. Lo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5-17. Comparación Preliminar de la EDAR de Biodiscos y la EFAR FFH.

<i>Parámetro</i>		<i>Valores en la EDAR de biodiscos</i>	<i>Valores en la EFAR FFH</i>	<i>Comentarios</i>	
Ocupación de terreno total		5.000,00 m ²	20.000,00 m ²	La EFAR ocupa mas	
Costo de adquisición del terreno total		1.669.650,00 Euros	6.678.600,00 Euros	La EFAR es mas costosa	
Costos de construcción de toda la estación		4.161.505,04 Euros	8.595.881,35 Euros	La EFAR es mas costosa	
Consumo de energía eléctrica total para operar maquinas de la estación		1.302.581,24 MJ/año	785.219,29 MJ/año	La EDAR consume más	
Emisiones de GEI del tratamiento de agua residual y operación de maquinas de la estación		24.306,72 Tm(CO ₂ e)/año	228.360,61 Tm(CO ₂ e)/año	La EFAR genera más	
Consumo de reactivos en el tratamiento del agua residual		47,64 Tm(NaOCl)/año + 1,351 Tm(FeCl ₃)/año	0	La EDAR consume más	
Generación de lodos deshidratados a disponer		772,57 Tm/año	563,77 Tm/año	La EDAR genera más	
Costos de operación y mantenimiento de cada estación		1.317.192,12 Euros/año	1.321.308,35 Euros/año	La EFAR es mas costosa	
Calidad del vertido de cada estación	Parámetros	Valores en el vertido	Valores en el vertido	Limites legales	Comentarios
	SS (mg/L)	16,4	19,75	40	Ambas cumplen
	DBO _{5,20} (mg/L)	34,7	0	35	Ambas cumplen
	DQO (mg/L)	63,5	143,6	130	La EFAR no cumple
	N (mg/L)	17,1	0	18	Ambas cumplen
	P (mg/L)	3,66	0	3	La EDAR no cumple

Los costos de la EFAR FFH en todos los casos son mayores que en la EDAR de biodiscos, y totalizan 16.595.789,70 Euros, mientras que en el segundo caso son de 7.148.347,16 Euros; por lo que queda claro que la EFAR FFH es 2,32 veces más costosa que la EDAR de biodiscos. La EFAR FFH ocupa cuatro veces más terreno que la EDAR de biodiscos. La EDAR de biodiscos consume 66% más de electricidad para operar maquinarias de la estación que la EFAR FFH. La EFAR FFH genera casi 10 veces más GEI que la EDAR de biodiscos. La EDAR de biodiscos consume 49 Tm/año de reactivos para el tratamiento del agua

mientras que la EFAR FFH no consume reactivos. La EDAR de biodiscos genera 37% más de lodos deshidratados a disponer que la EFAR FFH. La EDAR de biodiscos vierte el agua tratada con valores de fósforo un poco por encima del límite legal, mientras que la EFAR FFH vierte el agua tratada con valores de DQO por encima del límite legal, de resto, ambas estaciones cumplen con dichos límites.

5.5. Evaluación del Impacto Ambiental

En esta etapa del ciclo de vida se usan los resultados obtenidos en los inventarios antes mostrados para cuantificar los impactos ambientales potenciales, los cuales se calculan utilizando el software SimaPro®, que es una herramienta analítica que está de acuerdo con las normas de la serie ISO 14040.

Esta fase del ACV posee tres elementos obligatorios:

- Selección de categorías de impacto (e indicadores de categorías). Teniendo en cuenta los potenciales problemas ambientales que se pueden generar en las operaciones de ambas tecnologías propuestas para las poblaciones de Martín de La Jara y Los Corrales, se plantea evaluar las siguientes categorías de impacto Midpoint (Figura 4.6): cambio climático, agotamiento de ozono, toxicidad humana, ruido, acidificación terrestre, eutrofización de cuerpos de agua, ecotoxicidad, uso de suelo y agotamiento de fósiles. En este caso, los impactos finales (o categorías finales) son definidas como las áreas de protección y son calculados a partir de los Midpoint.
- Asignación de resultados de análisis de inventario (clasificación).
- Cálculo de resultados de distintos indicadores (caracterización).

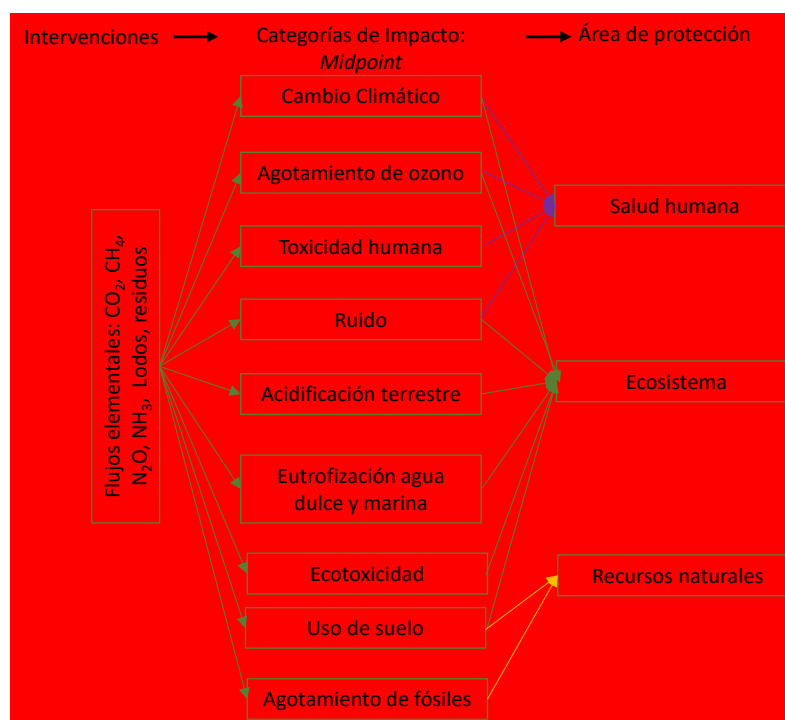


Figura 4.2. Esquemización de las relaciones entre intervenciones, categorías de impacto intermedias y áreas de protección. Modificado de Riffo, 2017 (Riffo J, 2017).

5.6. Identificación de las Actividades con Mayor Impacto

5.7. Selección de la Mejor Estación de Tratamiento del Agua Residual

REFERENCIAS

Arboleda, J., 2000. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. 3a ed. Tomo 2. Mc Graw Hill y ACODAL. Impreso en Colombia.

Benavides, H., y León, G., 2007. *INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM SUBDIRECCIÓN DE METEOROLOGÍA. Colombia, Diciembre 2007. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd> (Accedido: 27 de noviembre de 2020).

Castañon, L., Remesal, J., y Marquez, J., 2006. *PROYECTO DE CONCENTRACIÓN DE VERTIDOS DE MARTÍN DE LA JARA – LOS CORRALES. (SEVILLA) CLAVE: A5.341.992/0411 EXPEDIENTE: NET 601019. COMUNICACION AGRICULTURA EDAR. TOMO I. TOMO II. TOMO III. TOMO IV*. Consultor PAYMA Cotas GRUPO ECA GLOBAL. Egmasa Empresa de Gestión Medioambiental - Consejería de Medio Ambiente JUNTA DE ANDALUCIA. Noviembre 2006. Disponible en: <https://wetransfer.com/downloads/859e31cfc1a18b94946fab52439257e920201119190628/a3ce43> (Accedido: 23 de noviembre de 2020)

Corominas et al. (2020). The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A bestpractice guide and critical review. *Water Research* , 1-70.

Cristancho, D., Gámez, W., Guerra, J., y Dueñas, M., 2018. *Estimación de los gases efecto invernadero generados por las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en la cuenca del río Bogotá*. Revista

- Ingenierías Universidad de Medellín, 18 (34). Enero-Junio 2019. ISSN (en línea): 2248-4094. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v18n34/1692-3324-rium-18-34-25.pdf> (Accedido: 27 de noviembre de 2020).
- Dinero en el Tiempo, 2020. *Valor Actual del Dólar de 1978*. Página web. Disponible en: <https://www.dineroeneltiempo.com/dolar/de-1978-a-valor-presente#:~:text=Esto%20quiere%20decir%20que%201,de%20%244,14%20d%C3%B3lares%20de%202020> . (Accedido: 15 de noviembre de 2020).
- Dinero en el Tiempo 2, 2020. *Valor Actual del Dólar de 1977*. Página web. Disponible en: <https://www.dineroeneltiempo.com/dolar/de-1977-a-valor-presente> (Accedido: 15 de noviembre de 2020).
- Dixon, A et al. (2003). Assessing the environmental impact of two options for small-scale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach. . *Ecol. Eng.* , 297-308.
- ECO Inteligencia, 2013. *El Análisis del Ciclo de Vida*. Página web. Disponible en: <https://www.ecointeligencia.com/2013/02/analisis-ciclo-vida-acv/> (Accedido: 16 de noviembre de 2020).
- EPA. (1988). *Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*. Recuperado el 15 de 07 de 2020, de <http://yosemite.epa.gov/water/owrccatalog.nsf>
- European_Union, 2000. (s.f.). *EUR-Lex*. Recuperado el 28 de 07 de 2020, de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32000L0060>
- Figueruelo, J., y Dávila, M., 2004. *Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales*. Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España.
- Fuchs, V et al. (2011). Life cycle assessment of vertical and horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment considering nitrogen and carbon greenhouse gas emissions. *Water Research* , 2073-2081.
- García, J. S., Herrera, I., y Rodríguez, A., 2011. *Análisis de Ciclo de Vida de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. Caso: PTARM de Yautepec (Morelos, México)*. Informes Técnicos del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Ministerio de Ciencia e Innovación. Gobierno De España. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. Depósito Legal: M -14226-1995. ISSN: 1135 – 9420. NIPO: 471-11-009-8. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/048/42048177.pdf (Accedido: 19 de noviembre de 2020).
- Garfí M, et al. (2017). Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds. *Journal of Cleaner Production* , 211-219.
- Garfi, M, et al. (2012). Evaluating benefitsoflow-costhouseholddigestersforruralAndeancommunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 575–581.
- Geo Innova, s.f. *Análisis del Ciclo de Vida: ISO 14040*. Página web. Disponible en: <https://geoinnova.org/blog-territorio/analisis-del-ciclo-de-vida-iso-14040/> (Accedido: 16 de noviembre de 2020).
- Gobierno de España, y OECC, 2020. *FACTORES DE EMISIÓN REGISTRO DE HUELLA DE CARBONO, COMPENSACIÓN Y PROYECTOS DE ABSORCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Versión 15. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm30-479095.pdf (Accedido: 27 de noviembre de 2020).
- Greenpeace (2018). *LA INSOSTENIBLE HUELLA DE LA CARNE EN ESPAÑA Diagnóstico del consumo y la producción de carne y lácteos en España*. PDF en línea. Marzo de 2018. Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/03/INFORME-CARNEv5.pdf> (Accedido: 27 de noviembre de 2020).
- Guest et al. (2009). A New Planning and DesignParadigm to Achieve SustainableResource Recovery fromWastewater. *Environ. Sci. Technol.* , 6126-6130.
- Haya, E., 2016. *Análisis de Ciclo de Vida*. Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental. Licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Página web eoi.es.
- Headley et al. (2008). Floating treatment wetlands: an innovativeoption for stormwater quality applications. .

11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control , 1101-1106.

Hidrolution FMF. (2015). *Hidrolution. Sistema FMF patentado por la Universidad Politécnica de Madrid*. Recuperado el 24 de 07 de 2020, de <http://www.assul.com/hidrolution.html>

ISO. (2000). International Organization for Standardization. Environmental management- Life cycle assessment- Life cycle impact assessment: ISO 14042.

JOCA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIONES, S.A. y URBAJA PROMOCIONES Y CONSTRUCCIONES (2009). *Modificado nº 1 de las obras de construcción de estaciones depuradoras de aguas residuales de Almonacid del Marquesado, Puebla de Almenara, El Hito, Hontanaya, Horcajo de Santiago, Pozorrubio de Santiago y Villamayor de Santiago (Cuenca)*.

Lorenzo-Toja, Y et al. (2016). Beyond the conventional life cycle inventory in wastewater treatment plants. *Sci. Total Environ* , 71-82.

Lundie et al. (2004). Life Cycle Assessment for Sustainable Metropolitan Water Systems Planning. *Environ. Sci. Technol.* , 3465-3473.

Martelo y Lara. (2012). Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte. *Ingeniería y Ciencia* , 221-243.

Massoud. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management* , 652-659.

METCALF & EDDY, INC., 1995. *INGENIERIA DE AGUAS RESIDUALES TRATAMIENTO, VERTIDO Y REUTILIZACION*. 3ª ed. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. IMPRESO EN ESPAÑA.

Pedescoll, et al. (2013). Design configurations affecting flow pattern and solids accumulation in horizontal free water and subsurface flow constructed wetlands. *Water Research* , 1448-1458.

Pierre F. (2009). Implementation of LCA on a wastewater treatment plant. Preliminary results. *Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, Nancy* .

Quarq Enterprise. (2016). Sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante tecnologías sostenibles. *FuturEnviro* .

Quarq Enterprise S.A., s.f. *Herramienta de Dimensionamiento de Sistemas de Depuración Mediante Helófitas en Flotación*. Página web. Disponible en: <http://www.quarqenterprise.com/blog-dynamic/88-herramienta-de-dimensionamiento> (Accedido: 30 de noviembre de 2020).

Renou, S et al. (2008). Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of Cleaner Production* , 1098-1105.

Riffo, J., 2017. *Análisis de Ciclo de Vida para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales: Potencial de Calentamiento Global Generado por PTAR Talagante*. Departamento De Ingeniería Química Y Biotecnología. Universidad De Chile. Santiago De Chile. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148239/Analisis-de-ciclo-de-vida-para-una-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accedido: 20 de noviembre de 2020).

Rodríguez, J., García, C., y Zafra, C., 2016. *El Análisis del Ciclo de Vida Aplicado a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Ciencia y Sociedad, vol. 41, núm. 3, pp. 617-636. Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320543536_El_analisis_del_ciclo_de_vida_aplicado_a_las_plantas_de_tratamiento_de_aguas_residuales (Accedido: 19 de noviembre de 2020).

Romero, J., 2008. *Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principio de Diseño*. 3ª ed, 2ª reimpresión. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. ISBN 958-8060-13-3. Colombia.

Rozkosný, et al. (2014). *Natural Technologies of Wastewater Treatment*. Global Water Partnership Central and Eastern Europe.

Salas, J., s.f. *La depuración mediante "Macrófitas en flotación" contada por su autor (I)*. Página web. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/depuracion-mediante-macrofitas-flotacion-contada-autor-i> (Accedido: 30 de noviembre de 2020).

Secretaria de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, s.f. *NORMA DE CALIDAD DEL AGUA Y CONTROL DE DESCARGAS AG-CC-01*. Disponible en: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/dom60779.pdf> (Accedido: 14 de noviembre de 2020).

Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering* , 724-751.

Vymazal, J. (2005). Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering* , 478-490.

World Resources Institute (WRI), C40 Cities e ICLEI, 2014. *PROTOCOLO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Protocolo Global para Inventarios de Emisión de Gases de Efecto Invernadero a Escala Comunitaria Estándar de contabilidad y de reporte para las ciudades*. Disponible en: http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/other_uploads/images/1016_GPC_Full_MASTER_v6_ESXM-02-02_FINALpdf.original.pdf?1486373653 (Accedido: 27 de noviembre de 2020).

Yildirim y Topkaya. (2012). Assessing Environmental Impacts of Wastewater Treatment Alternatives for Small-Scale Communities. *Clean – Soil, Air, Water* , 171-178.

Índice de Conceptos

conceptos.....	9
----------------	---

glosario

ISO: International Organization for Standardization	4
UNE: Una Norma Española	4