



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERIA AMBIENTAL

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS CON
FILTRO DE MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN**

Autor: D. Rodrigo de la Fuente González
Tutor: D. María Fdz-Polanco Iñiguez de la Torre

Valladolid, Julio, 2018

RESUMEN

Se ha realizado un diseño de una planta de tratamientos de aguas residuales (EDAR, mediante un tratamiento principal de Humedales con Filtro de Macrófitas en flotación. Se explica el funcionamiento de estos sistemas de depuración, sus características, sus ventajas y desventajas frente a tratamientos convencionales. Este trabajo se centra principalmente en el uso de filtros con Macrófitas en flotación, para poder explicar su capacidad de depuración de aguas y demostrar que son una alternativa eficiente a otro tipo de tratamientos con tecnologías blandas y se explican los costes estimados de estos métodos. El humedal está dimensionado con un caudal máximo de 3600 m³/d, con una superficie total de 13.634,42 m². Y consta de un pretratamiento con tanque de homogeneización, un desbaste de gruesos, finos y tamiz rotativo, un tratamiento primario con desarenador-desengrasador y un decantador Emscher, el tratamiento principal de FMF y una precipitación química de fosforo antes de vertido.

ABSTRACT

I have made a design for a wastewater treatment plant, through a main treatment Wetland with macrophyte filter in flotation.

It explains the operation of these systems of purification, its characteristics, its advantages and disadvantages compared to conventional treatments. This paper focuses solely on the use of filters with floating macrophyte, in order to explain their wastewater treatment ability and show that they're an efficiency alternative to other soft treatments and finally to explain their cost.

The wetland is designed for 3600 m³/d, with an area of 13.634,42 m². It consist of a pretreatment with homogenization tank, a roughing of coarse, fine and rotary screen, a primary treatment of grit removal and degreaser and one Emscher digester, the main treatment is macrophyte filter in flotation and finally the chemical precipitation of P before discharge.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	1
3. SITUACIÓN Y ESTADO DE LA TÉCNICA	2
3.1. Fundamentos	2
3.2. Tipos de humedales artificiales	2
3.3. Filtro de macrófitas en flotación	4
3.4. Tipos de Macrófitas acuáticas flotantes	7
3.4.1. <i>Typha spp.</i> (Enea o Espadaña).....	8
3.4.2. <i>Eichhcornea crassipes (Martius) Solms</i> (Jacinto de agua).....	9
3.4.3. <i>Lemna spp.</i> O <i>Spirodella Spp.</i> (lentejas de agua).....	10
3.4.4. Otros tipos de plantas acuáticas	10
3.5. Rendimientos de eliminación con Filtro de Macrófitas Flotantes:.....	11
4. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL	13
5. LÍNEA DE TRATAMIENTO	14
5.1. Pretratamiento y Desbaste.....	14
5.1.1. Tanque de homogeneización	14
5.1.2. Rejas de gruesos y finos	15
5.1.3. Tamiz rotativo.....	15
5.2. Tratamiento primario	17
5.2.1. Desarenador-Desengrasador.....	17
5.2.2. Decantador tipo Emscher.....	18
5.3. Tratamiento secundario extensivo	20
5.3.1. Humedales FMF.....	20
5.3.2. Elección de plantas macrófitas y técnicas de manejo en humedales.....	21
5.3.3. Fijación de las plantas.....	23
5.4. Tratamiento terciario	24
5.4.1. Precipitación de fosforo.....	24
6. BALANCES DE MATERIA Y DIMENSIONAMIENTO	26
6.1. Pretratamiento. Tanque de homogeneización.....	26
6.2. Desbaste	27
6.3. Tratamiento primario	35
6.4. Tratamiento secundario extensivo. Humedales FMF.	44
6.5. Precipitación química del fósforo	55
7. MANTENIMIENTO	58
8. ESTIMACIÓN DE COSTES ENTRE DIFERENTES SISTEMAS	60
9. CONCLUSIONES	62

10. MARCO LEGAL 63
11. DIAGRAMA DE PROCESOS 64
12. BIBLIOGRAFÍA 65

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la problemática existente con la depuración de las aguas residuales de las zonas con poblaciones pequeñas (vertidos sin tratar, grandes obras sobredimensionadas, etc.), surgen las tecnologías blandas, que son una alternativa más económica que un EDAR convencional para este tipo de zonas, una de estas alternativas son los humedales artificiales.

Los humedales artificiales consisten en un monocultivo o policultivo de plantas superiores (macrófitas) dispuestas en lagunas, tanques o canales poco profundos, estos humedales se encuentran dentro de un grupo denominado "Tecnologías extensivas o blandas", Las tecnologías extensivas se caracterizan porque los procesos de depuración, en los que se basan, transcurren a velocidad "natural" (sin aporte de energía) y se desarrollan en un único "reactor-sistema" (Metcalf y Eddy, 2002). El ahorro en energía se compensa con una mayor necesidad de superficie.

El efluente, después de recibir una serie de tratamientos previos, pasa a través del humedal durante un tiempo de retención, en el humedal, el agua se trata a través de varios procesos físico, químicos y biológicos. El oxígeno necesario para estos procesos es suministrado por las propias plantas, que lo forman por fotosíntesis o lo toman del aire y después lo inyectan hasta la zona radicular. La transferencia de oxígeno hacia la zona radicular por parte de estas plantas acuáticas es un requisito imprescindible para que la eliminación microbiana de algunos contaminantes se realice con eficacia, estimulando además la degradación de materia orgánica y el crecimiento de bacterias nitrificantes.

Los mecanismos que tienen lugar para la depuración de contaminantes constituyen una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, pero la remoción de los contaminantes es básicamente mediante la nitrificación.

Las principales funciones de las plantas en estos sistemas son:

- Airear el sistema radicular y facilitar oxígeno a los microorganismos que viven en la rizosfera.
- Absorción de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
- Eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos.
- Filtración de los sólidos a través del entramado que forma su sistema radicular.

La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de éstas al clima local, su capacidad de transportar oxígeno desde las hojas hasta la raíz, su tolerancia a concentraciones elevadas de contaminantes, su capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, su resistencia a insectos y enfermedades y su facilidad de manejo. (Fernández et al. 2002)

2. OBJETIVOS

Este estudio se dimensiona una planta depuración de aguas residuales urbanas con sistemas de filtros de plantas acuáticas, para aprovechar el potencial que tienen éstas para realizar la depuración de agua como lo haría un ecosistema natural, imitándolo pero bajo condiciones controladas.

Como objetivo secundario es el ver los diferentes tipos de sistemas que existen con sus variedades de plantas, hacer una revisión del coste de implantación de estos sistemas con el de un EDAR convencional.

3. SITUACIÓN Y ESTADO DE LA TÉCNICA

3.1. Fundamentos

Los humedales artificiales, son sistemas para la depuración de aguas en donde se imita la eliminación de contaminantes tal y como lo haría un ecosistema acuático natural. El carácter artificial viene dado por (Salas et al. 2007):

- El humedal (estructura) se construye mecánicamente y se impermeabiliza para así evitar pérdidas de agua.
- Se emplean sustratos diferentes al del terreno sobre el que se construye para enraizar las plantas (en especies flotantes no es necesario).
- Se eligen las plantas que colonizaran el humedal.

La depuración tiene lugar cuando se hace circular el agua residual a través de los humedales, donde ocurren una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. En un humedal artificial hay una serie de elementos indispensables que participan en la depuración de aguas (Vymazal, 2008; Kadlec et al., 2009):

- El agua residual que circula por el humedal.
- El sustrato; sirve de soporte a la vegetación y permite fijar la población microbiana, puede ser orgánico o inorgánico.
- Plantas emergentes acuáticas (macrófitas), proporcionan superficie para la formación de películas bacterianas, facilitan la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, contribuyen a la oxigenación del sustrato y a la eliminación de nutrientes y controlan el crecimiento de algas, al limitar la penetración de la luz solar. Asimismo, la vegetación permite la integración paisajística de estos dispositivos de tratamiento.

Se usa la misma vegetación que existe en los humedales naturales; que son las plantas acuáticas emergentes (carrizos, juncos, aneas, etc.), halófitos o flotantes (macrófitas), que toleran bien la falta de oxígenos, que se dan en zonas encharcadas, todo gracias a que cuentan con un canal interno (zona de aireación) denominada aerénquima, la cual facilita el paso del oxígeno desde las zonas aéreas hasta las raíces (zona radicular) (Tanner et al., 2003; Crites et al., 2006) y tienen una elevada productividad de biomasa, del orden de 50-70 toneladas mat. seca/ha.año (Martin, 1989).

3.2. Tipos de humedales artificiales

Existen 3 tipos distintos de humedales:

- **Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS) o Flujo Libre:** (*Surface Flow Wetlands*, SFW, o *Free Water Surface Wetlands*, FWS), el agua a tratar circula por encima del sustrato donde están enraizadas las plantas, circulando alrededor de sus tallos y hojas, por lo que se encuentra expuesta directamente a la atmósfera. Estos humedales están constituidos por balsas o canales con vegetación emergente y niveles de agua poco profundos (0,4 m), son los clásicos. El esquema de funcionamiento se ve en la Ilustración 1.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

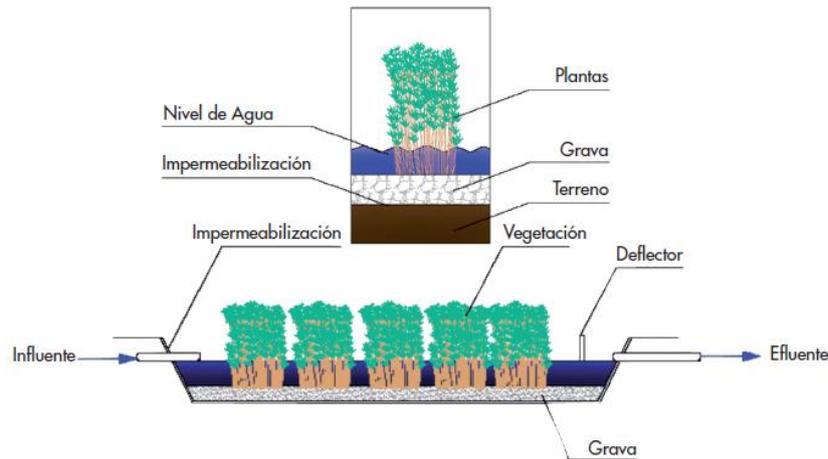


Ilustración 1: Corte transversal y longitudinal de un HAFS. Manual depuración MAPAMA.:

- **Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSS):** (*Subsurface Flow Wetlands, SSFW, o Vegetated Submerged Beds, VSB*), el agua recorre el humedal de forma subterránea, a través de los espacios intersticiales del lecho filtrante (a través de un medio granular como arena, gravilla, grava) de permeabilidad suficiente y en contacto con los rizomas y raíces de las macrófitas (Vymazal et al., 2008). Por lo que se dan procesos similares a los que tienen lugar en los tratamientos mediante filtración. Estos a su vez se dividen en humedales artificiales de flujo subsuperficial Horizontal (HAFSS horizontal) y Vertical (HAFSS vertical). En la ilustración 2 se puede ver el esquema de funcionamiento y las características constructivas de los HAFSS horizontal y vertical.

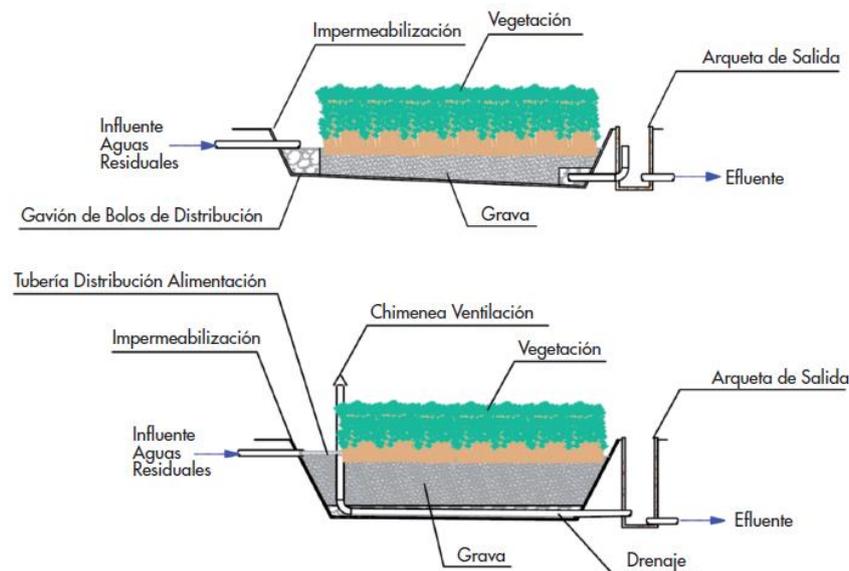


Ilustración 2: Cortes longitudinales de HAFSS Horizontal y HAFSS Vertical. Manual depuración MAPAMA.

- **Filtro de macrófitas en flotación (FMF):** se trata de una variante de los Humedales de Flujo Superficial, que en lugar de tener plantas emergentes sobre el sustrato semi-sumergidas, usa las especies flotantes como las lentejas de agua o las mismas macrófitas emergentes mediante el sistema *Hidrolution*, que las dota de las características de las

plantas flotantes. En la tabla 1 se pueden observar las características de los sistemas de flotación y los de flujo superficial.

Parámetro	Sistema FMF	Sistema FHS
Superficie de plantación requerida (m ² /he)	1 – 3	1,5 – 2,5
Tiempo de retención hidráulica (d)	7,5 – 10	> 5
Lugar de ubicación de las macrófitas	Balsas	Canales de anchura entre 2,5 y 4 m
Profundidad lámina de agua (m)	0,5 – 5	> 0,5
Plantas	Macrófitas emergentes	Fundamentalmente enneas o esparganios
Densidad de plantación inicial (plantas/m ²)	10,8 – 40,5	10
Mantenimiento	Tratamientos fitosanitarios	Segado 2 o 3 veces al año
Tiempo de entrada en funcionamiento	1 periodo vegetativo	1 año para alcanzar el máximo rendimiento
Pretratamiento	Desbaste+Desarenado+ Tamizado+Desengrasado	Desbaste+Fosa séptica/Tanque Imhoff

Tabla 1: Tabla comparación entre humedales FMF y FHS. Manual de depuración de agua en pequeñas poblaciones, MAPAMA.

En este trabajo se considera como alternativa a usar los sistemas de macrófitas en flotación, debido a que se considera una alternativa útil y eficiente para la reducción de contaminantes de aguas residuales en pequeñas poblaciones, además este sistema se ha usado en varios proyectos cerca de Valladolid y se han observado resultados óptimos de rendimiento. En la foto 1 se puede ver el proyecto real existente en Villanubla.

3.3. Filtro de macrófitas en flotación

Como se ha explicado antes, este tipo de humedales artificiales son una variante del Humedal Horizontal de Flujo Superficial, pero con mayor profundidad de la lamina de agua, mayor densidad de plantas por metro cuadrado y en lugar de usar canales, se construyen balsas donde estarán las plantas (tabla 1).

Los procesos que tienen lugar para la depuración de contaminantes con macrófitas flotantes se dan a través de tres mecanismos primarios (H. Brix, 1997 y Fernández et al, 2001):

- Filtración y sedimentación de sólidos.
- Incorporación de nutrientes en plantas y su posterior cosechado.
- Degradación de la materia orgánica por un conjunto de microorganismos facultativos asociados a las raíces de las plantas; y en los detritos del fondo de la laguna, dependiendo del diseño.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación



Foto 1: Humedal macrófitas en flotación, EDAR Villanubla. Rodrigo de la Fuente, 2018.

Características:

Se tratan de sistemas naturales totalmente respetuosos e integrado con el medio ambiente, que eliminan sólidos en suspensión, materia orgánica, elementos eutrofizantes y microorganismos patógenos. Las características constructivas y su sencillas como obra se pueden ver en la ilustración 3.

Otras características son:

- Coste de instalación muy inferior al de una depuradora convencional.
- Mantenimiento sencillo, con bajo coste y reducido o nulo consumo de energía.

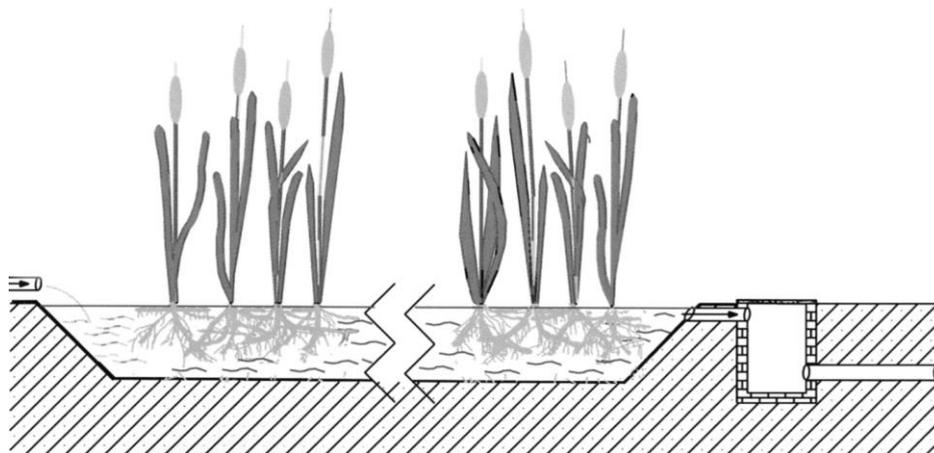


Ilustración 3: Esquema de humedal tipo FMF (flujo superficial). Manual de Fitodepuración, 2015

Funcionamiento y eliminación de contaminantes:

Durante la etapa de crecimiento, las Macrófitas absorben e incorporan los nutrientes en su propia estructura (G. Henry-Silva et al, 2008) y funcionan como sustrato para los microorganismos, estos mediante simbiosis producen la asimilación de nutrientes mediante transformaciones químicas, principalmente nitrificación y desnitrificación (S. Peterson and J. Teal, 1996, A. Nahlik and W. Mitsch, 2006). El esquema de construcción de un humedal FMF y la disposición de las plantas y las raíces en el agua residual (ilustración 3).

Durante el procesos de fotosíntesis, las plantas usarán el O_2 y el CO_2 disponible, los nutrientes los irán tomando del agua residual, a través de las raíces (están sumergidas a cierta profundidad), que a su vez, también sirve como filtro para captar los SST o la adsorción e éstos (EPA, Desing

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Manual, 1988). En este momento es importantísimo la disponibilidad de nutrientes en el agua y la demanda de estos en la planta para el desarrollo de la zona radicular, entonces, la densidad y la profundidad que alcancen las raíces dependerán de distintos factores como la calidad del agua a tratar, la cantidad de nutrientes disponibles y asimilables, la temperatura (del agua y la T^a ambiental), el régimen de cosecha y manejo, etc.

Los sistemas acuáticos de Macrófitas flotantes consiguen una reducción importante del paso de luz solar al agua, además disminuyen la transferencia de gases atmosfera/agua, consiguiendo sistemas libres de algas y en ciertas condiciones anaerobias (también depende de la profundidad del humedal (ilustración 4)). Recalcando la importancia de una buena aireación en el sistema mediante el manejo, de usar una profundidad de lámina de agua apta y la cosecha de las plantas en los periodos requeridos, ya que la eficiencia de remoción de contaminantes aumenta significativamente cuando existe aireación (condiciones aerobias) y recirculación del sistema.

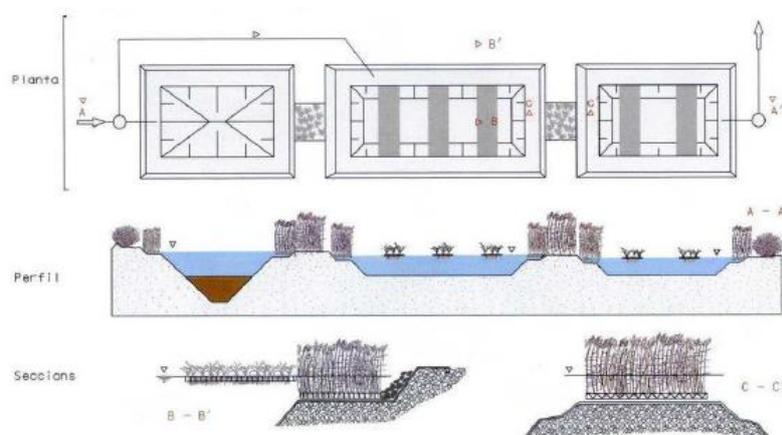


Ilustración 4: Esquema básico de humedal con FMF. Naturalea

Ventajas

La principal ventaja que ofrecen estos sistemas es la gran superficie de contacto que tienen sus raíces con el agua residual, están bañadas por completo, lo que permite una gran actividad depuradora de la materia orgánica por medio de los microorganismos adheridos a dicha superficie o por las propias raíces directamente (Condori L. y Delgadillo M. 2010). No obstante, la acumulación de bacterias en las raíces de las Macrófitas, puede convertir la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso de la cosecha, es muy importante el manejo y la agronomía de las plantas.

Otro tipo de ventajas de este sistema sería (Fernández et al, 2015):

- Mayor economía en la construcción, ya que no lleva ningún tipo de relleno. (Ilustración 4)
- Mayor economía en la implantación ya que se puede hacer sobre el propio canal o balsa sin tener que vaciarle. (Ilustración 4)
- Mejor funcionamiento por no existir resistencia al paso del agua por colmatación del lecho.
- Mayor economía en el mantenimiento, ya que no existe colmatación y por lo tanto no es necesario la retirada periódica del lecho de grava junto con las raíces y rizomas, causantes de la colmatación.
- Mayor capacidad de depuración por estar todo el sistema radicular bañado por el agua.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

- Facilidad de cosechar la totalidad de la biomasa formada (incluidas las raíces y rizomas) en los casos en que se quiera eliminar elementos minerales fijados por las plantas o aprovechar la biomasa formada para fines energéticos o industriales, como podría ser el caso de que se utilicen plantas productoras de rizomas amiláceos. En la foto 2 se puede ver un humedal FMF cuando hay que recoger la biomasa generada, se ve que es bastante frondoso.
- Los lodos son digeridos en el fondo del canal, por lo que no es necesaria su retirada, los lodos derivados del decantador Emscher se llevan hasta los humedales.



Foto 2: Humedal de Macrófitas en Flotación, EDAR Villanubla. Rodrigo de la Fuente, 2018.

Inconvenientes

La principal desventaja de los sistemas con Macrófitas flotantes es la capacidad limitada que tienen de acumular biomasa, en este sentido las Macrófitas emergentes tienen mayor ventaja (son más grandes y pueden llegar a crecer hasta los 2-3 m, por lo que pueden acumular más biomasa (Fernández et al, 2015), por lo que se deben hacer retiros periódicos es ésta para permitir el correcto crecimiento de las plantas, y esto encarece la mano de obra (Fernández et al, 2015). Otra desventaja es la proliferación de mosquitos como vectores transmisores de enfermedades (A. Nahlik y W. Mitsch, 2006), lo que condiciona la ubicación de los sistemas lejos de poblaciones o incrementa el control sobre el humedal y la necesidad de hacer tratamientos con pesticidas para controlar esas poblaciones.

3.4. Tipos de Macrófitas acuáticas flotantes

Las Macrófitas flotantes comprenden un variado grupo de plantas. La morfología de las Macrófitas flotantes es diferente dependiendo de la especie de la que se hable, en este trabajo solo se explicarán algunas plantas usadas en los sistemas, y se centrará únicamente en el uso de plantas acuáticas flotantes en sistemas acuáticos y en Macrófitas emergentes. El principal y más grave problema es que se tratan de especies altamente invasoras, por lo tanto habría que tener un control de la población exhaustivo.

3.4.1. *Typha* spp. (Enea o Espadaña)



Ilustración 5: Espadaña en margen de laguna. Jordi Badía

Descripción:

Es una macrófita que se encuentra en el margen más interior de la orilla de los cursos de agua lentos, de las pozas de arroyos y de las charcas. Posee rizomas subterráneos que le permiten extenderse y constituir poblaciones monoespecíficas o, a veces mixtas junto a su congénere, la enea de hoja estrecha (*T.angustifolia*). La enea de hoja ancha saca unas hojas basales en forma de cinta larga, de hasta 2 metros de altura y de 1 a 2 cm de ancho, de color verde azulado. Los tallos están coronados por la inflorescencia que consta de dos partes, la inferior que contiene las flores femeninas y, en posición contigua, la parte superior más estrecha y clara donde se encuentran las flores masculinas. A diferencia de la enea de hoja ancha, la de hoja estrecha no suele ser tan robusta, efectivamente sus hojas de color verde claro no superan 1 cm de ancho y, finalmente, las dos partes de la inflorescencia, la masculina arriba y la femenina abajo, están separadas por un tramo de tallo libre. Son tres especies: *T. latifolia* L., *T.angustifolia* L, y *T. domingensis* (Pers.) Steudel, que ocasionalmente pueden hibridar entre sí. Las eneas son las plantas más preparadas para Fitodepuración (como tratamiento secundario o terciario)

Ciclo de desarrollo:

Son plantas herbáceas perennes, ya que tiene un sistema radicular rizomatoso perenne, aunque el ciclo de la planta es anual. En primavera, la planta brota a partir de yemas situadas en los rizomas, y desarrolla numerosas hojas nuevas. En verano se desarrolla un tallo aéreo que lleva inflorescencias, de donde saldrán los frutos, en otoño la planta se seca y senece en invierno se diseminan los frutos, en la siguiente primavera comienza de nuevo otro ciclo de brotación desde los rizomas. A lo largo de varios ciclos anuales, la planta va a ir colonizando el humedal, en un denso entramado de rizomas y raíces, y en la parte emergente, a una agrupación espesa de hojas y tallos en la que no pueden distinguirse plantas individuales. Por esta razón, las eneas siempre aparecen en los humedales formando colonias en los humedales.

3.4.2. *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms (Jacinto de agua)



Ilustración 6: Jacinto de agua, El Nou Garden.

Descripción:

El Jacinto de agua es una planta acuática flotante no enraizada, es una planta herbácea perenne de agua dulce, con desarrollo ascendente, de tallo vegetativo sumamente corto, hojas en rosetas, ascendentes a extendidas, pecíolos cortos, hinchados (bulbosos), con tejido aerenquimatoso, con dimorfismo foliar al crecer agrupadas, hojas puramente ascendentes y pecíolos elongados y menos hinchados, láminas de 2 a 16 cm. Inflorescencia: espiga; flores azules a celestes, y una mancha amarilla en el lóbulo superior del perianto, fruto: cápsula de 1,5 cm. (Sandra Soto Bayó. MAPAMA, 2007).

Ciclo de desarrollo:

En su hábitat natural el Jacinto de agua es una planta herbácea perenne de rápido desarrollo, que se extiende lateralmente mediante el desarrollo de estolones y formación de renuevos, hasta cubrir toda la superficie del agua formando una densa cubierta vegetal muy vistosa por su coloración verde brillante salpicado del azul de las flores. Las características de rápido crecimiento y alta productividad hacen que en cursos de agua naturales y en determinadas circunstancias, pueda llegar a ser un grave problema. Sin embargo, estas características son muy ventajosas cuando se utiliza en ambientes controlados para el tratamiento de aguas residuales.

Se reproduce principalmente por propagación vegetativa, esto es, mediante estolones que radian desde base de la planta y desarrollan renuevos. También puede reproducirse mediante semilla, y de hecho la semilla constituye una fuente de re-infestación cuando se erradica la población. (Fernández et al, 2015.)

3.4.3. *Lemna spp. O Spirodella Spp. (lentejas de agua)*

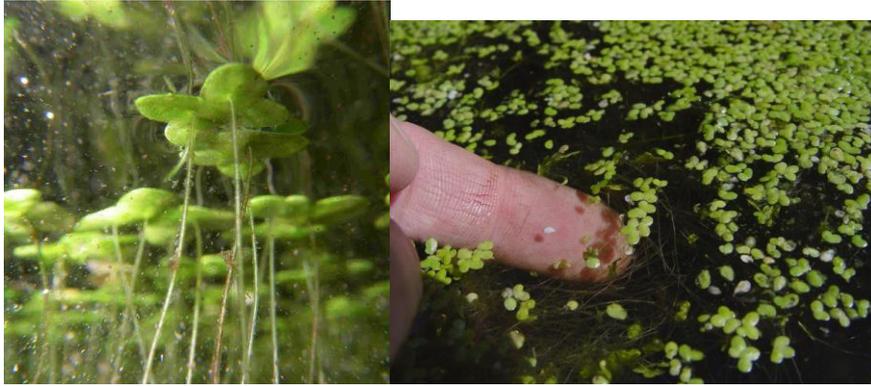


Ilustración 7: Lenteja de agua. El jardín en su puerta. Ilustración 8: Lemna minor. Go Botany, New England Wild Flower Society. 2018.

Descripción:

Es una planta angiosperma (plantas con flores), monocotiledónea, perteneciente a la familia Lemnaceae. Su cuerpo vegetativo corresponde a una forma taloide (no se diferencian el tallo y las hojas). Consiste en una estructura plana y verde y una sola raíz delgada de color blanco. (María del Pilar Arroyave. 2002.)

Su tamaño es muy reducido, alcanzando de 2 a 4 mm de longitud y 2 mm de ancho. Es una de las especies de angiospermas más pequeñas que existen (Raven et al. 2009).

La lenteja de agua es una planta monoica, con flores unisexuales. Las flores masculinas están constituidas por un solo estambre y las flores femeninas consisten en un pistilo formado por un solo carpelo. Las flores nacen de una hendidura ubicada en el borde de la hoja, dentro de una bráctea denominada espata. El fruto contiene de 1 a 4 semillas (Armstrong 2003, Instituto Gallach, 1984).

Ciclo de desarrollo:

Lemnaceae a un determinado medio acuático se produce a través de un agente dispersador accidental, como pueden ser las aves, el hombre o la introducción de un flujo de agua que contenga algún fronde.

La colonización del nuevo medio se produce rápidamente, siempre que las condiciones ambientales sean favorables para la especie. Como ya se ha indicado, el mecanismo de propagación de las Lemnaceae es vegetativo, mediante la formación de 'frondes hijo' a partir de un 'fronde madre'. Este mecanismo es muy eficaz llegando algunas especies incluso a duplicarse en número en tan sólo 24 h. Además, un fronde puede producir al menos 10-20 frondes más durante su vida. Por esta razón las Lemnaceae tienen una alta productividad potencial en biomasa. (Fernández et al, 2015.)

3.4.4. Otros tipos de plantas acuáticas

- ***Pistia stratiotes* (lechuga de agua):** Las plantas de *Pistia stratiotes* flotan en la superficie del agua con sus raíces que cuelgan sumergidas debajo de las hojas flotantes. Es una planta perenne monocotiledónea con las hojas gruesas, suaves que forman una

roseta. Las hojas pueden tener hasta 14 centímetros de largo y tener algún vástago, son de márgenes verdes, con las venas paralelas, onduladas ligeras y se cubren con pelos cortos que forman como la estructura de una cesta que atrapan burbujas de aire, aumentando la flotabilidad de la planta. Las flores son dioicas, y se ocultan en el centro de la planta entre las hojas, las bayas verdes pequeñas se forman después de la fertilización. La planta puede también realizar un tipo de reproducción asexual, la planta madre y las hijas están conectadas por un estolón corto, formando densas esteras que cubren las superficies de charcas y de ríos de caudal lento. (*Royal Botanic Gardens*)

- ***Salvinia Spp. (salvinia)***: Es un helecho acuático, flotante, que produce un rizoma horizontal (bajo la superficie del agua) y dos tipos de frondes (flotantes y sumergidas). Sus hojas (frondes) se disponen en grupos de tres (dos flotantes y una sumergida). Las flotantes se colocan opuestas entre sí y son de forma oblonga. En su cara superior tienen filas de papilas cilíndricas. Son de color verde, a menudo con bordes de color marrón, en las plantas maduras, y con un característico pliegue en el centro. Asimismo, son anchas y de entre 0,5 y 4 cm de longitud, siendo la epidermis brillante y tersa (Sanz Elorza M. et al, 2004).
- ***Hydrocotyle ranunculoides***: Es una planta acuática con tallos horizontales, rizomatosos y estoloníferos, acuáticos flotantes y también rastreros en suelo saturado, con nudos radicales. Los escapos son glabros, 15-45 mm de largo, opuestos a las hojas. Hojas con pecíolos delgados, no peltadas, 3-40 cm de longitud. Las estípulas son cóncavas, orbiculares, enteras, con estrías pardas. Las hojas son de suborbiculares a reniformes, 5-7 nervadas, base emarginada, hendida hasta la mitad, 5-8 mm largo. Tiene umbelas simples, 4-12 flores, y pedicelos de 1-2 mm de largo, ascendentes. Los involucros con brácteas de 1-2 mm de largo y ápice obtuso. Pétalos cremosos, puntuados, aovados, acuminados, 0,4-0,7 mm de largo. Su estilopodio es plano, estilos de 1 mm de longitud. Fruto suborbicular lateralmente apretado, base emarginada, castaño-amarillento a pardo-rojizo (Gonçalves, 1978).

3.5. Rendimientos de eliminación con Filtro de Macrófitas Flotantes

De las plantas seleccionadas para usarse en el filtro de macrófitas, destacan la *Eichhornia crassipes (Martius) Solms* (Jacinto de agua) que tiene una capacidad de reducción de DBO hasta del 95,1 %, de DQO hasta 90,25 %, de SST hasta del 92 %, de N hasta 91,7% y de P hasta el 98,5 %. Mientras que las especies derivadas de las lentejas de agua (*Lemna minor* y *L. gibba* o *Spirodella*) llegan a ser capaces de reducir la DBO hasta el 95,7 %, la DQO un 87,1 %, los SST UN 92% y el P 67% y el N un 89%. (Tabla 2).

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Especie	Porcentaje de remoción												
	DBO	DQO	SS	P total	N Total	As	Fe	Mn	Pb	Cu	Cr	Cd	Zn
<i>Eichhornia crassipes</i>	37 - 95,1	72,6 - 90,25	21 - 92	42,3 - 98,5	72,4 - 91,7	80	78,6 - 90,1			86 - 95	60 - 89	40 - 85	48 - 95
<i>Pistia stratiotes</i>	57 - 91,9	70,7 - 93,47	80,6	25 - 64,2	51,7 - 87,6		78,3 - 95	86,8 - 98,4	90 - 99,7	68 - 97,3	64 - 99,6	63 - 87	82 - 92
<i>Lemna minor</i>	94,4			67	89	5	78,47	95,20	98,55	77 - 90,41	96,94		97,56
<i>Lemna gibba</i>	50 - 95,7	64,7	30 - 92				54,4						
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	88,7	72,2	74,3	69 - 71,3	42,9 - 87,5								
<i>Spirodela polyrrhiza</i>							77,5 - 83,5			76 - 91	62 - 83	63 - 71	82 - 92
<i>Spirodela intermedia</i>							80,23	96,91	98,22	91,7	33,88		95,73
<i>Salvinia natans</i>	73,6 - 83,8	76,6 - 87,1		10,3 - 31,3									
<i>Salvinia herzogii</i>									90		64	84	
<i>Salvinia rotundifolia</i>									85 - 95				
<i>Azolla</i>	69,6			60	52,4	60							
<i>Egeria densa</i>		79,8 - 92,5											
<i>Phragmites communis</i>		58,82											
<i>Dryan</i>		83,4		90,4	84,0								
<i>Waseyutaka</i>		80,7		89,9	79,6								
<i>Tachimasari</i>		85,4		88,3	80,3								
<i>Hydromistia stolonifera</i>												76	

Tabla 2: Eficiencia de remoción de contaminantes con distintas Macrófitas flotantes. (Jorge Martelo et al. 2012)

Mientras que los datos reales de reducción de contaminantes en aguas residuales urbanas, como la planta de tratamiento existente en el aeropuerto de Reus, indica un porcentaje muy parecido de reducción a los de las especies seleccionadas usando las macrófitas emergentes en flotación (uso de Enea), siendo las reducciones de los parámetros más importantes de más del 90%, a excepción del P. por lo tanto se pueden usar las especies nombradas que estén disponibles en el momento de la ejecución del proyecto (tabla 3).

Datos rendimiento Macrófitas (EDAR aeropuerto Reus)				
Parámetros	Agua bruta	Agua tratada	Límite de vertido	Reducción-rendimiento
DQO (mg/l)	789	67	125	92%
DBO5 (mg/d)	340	9,5	25	97%
SST (mg/l)	254	7	60	97%
Nitrógeno (NH3+NO3-) (mg/l)	92,4	7,8	15	91%
Fosforo (PO4-3) (mg/l)	8	5,5	2	31%
Microorg. Total	283x10 ³ /l	19x10 ³ /l		93%
Coliformes Total	269x10 ³ /l	17x10 ³ /l		94%
Coliformes fecal	55x10 ³ /l	1x10 ³ /l		98%

Tabla 3: Datos Rendimiento con Enea. EDAR FMF Aeropuerto Reus.

4. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL

El agua a tratar es la de la población de Villanubla, según los datos proporcionados por el Ayuntamiento de Villanubla, la capacidad de generación de agua residual del municipio (sin contar el aeropuerto) se divide en dos grupos, la parte residencial y la del polígono industrial, con una población equivalente igual a 13.943 h.e.

	<i>h.e</i>
<i>Residencial</i>	8196
<i>P. Industrial</i>	5738
<i>TOTAL</i>	13934

Y con una carga contaminante de diseño proporcionada también por el ayuntamiento de Villanubla (Valladolid).

<i>Carga contaminante del diseño</i>						
<i>características del agua a la entrada al EDAR</i>						
<i>Qmedio</i>	<i>Qpunta (40%+)</i>	<i>Qmin (30%-)</i>	<i>DBO</i>	<i>DQO</i>	<i>T° media agua</i>	<i>T° mínima</i>
<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>	<i>m³/h</i>	<i>kg/d</i>	<i>mg/l</i>	<i>°C</i>	<i>°C</i>
150	360	40	836,04	440	20	15

Tabla 4: Datos del Proyecto EDAR Villanubla.

Teniendo en cuenta los datos de Villanubla (Valladolid), a excepción de los datos de N y P han sido sacados teóricamente de la guía práctica de depuración de aguas de la Confederación hidrográfica del Duero. Se obtienen las siguientes características del agua a tratar, con los que se han elaborado la siguiente tabla (tabla 5).

<i>Hab. Equiv.</i>	<i>Q</i>	<i>SST</i>		<i>DBO5</i>		<i>DQO</i>		<i>N</i>	<i>P</i>
<i>h.e.</i>	<i>m³/h.e. d</i>	<i>g/h.e. d</i>		<i>g/h.e. d</i>		<i>g/h.e. d</i>		<i>g/h.e. d</i>	<i>g/h.e. d</i>
	0,25	90		60		110			
13934	m³/d 3483,5	mg/L 360	kg/d 1254,06	mg/L 240	kg/d 836,04	mg/L 440	kg/d 1532,74	mg/L 40	mg/L 10
	m³/h 145,15	kg/ m³ 0,36		kg/ m³ 0,24		kg/ m³ 0,44		kg/ m³ 0,04	kg/ m³ 0,010

Tabla 5: Datos iniciales de partida

5. LÍNEA DE TRATAMIENTO

El diagrama de bloques del tratamiento es el siguiente; con un total de corrientes a la salida de cada tratamiento:



Ilustración 9: Diagrama de bloques del proceso. Rodrigo de la Fuente

Q1: La corriente de entrada al EDAR y al pretratamiento y desbaste.

Q2: La corriente que sale del pretratamiento y del desbaste (Tanque de homogeneización, reja de gruesos y finos y el tamiz rotativo) y entra en el tratamiento primario.

Q3: La corriente que sale del tratamiento del desarenador-desengrasador y entra en el Emscher.

Q4: La corriente que abandona el decantador Emscher y entra en los humedales.

Q5: La corriente que sale de los humedales y entra en la precipitación del fosforo.

Q6: La corriente que ya, bajo los límites permitidos, va a vertido al río.

5.1. Pretratamiento y Desbaste

Previo al tratamiento de depuración, el agua bruta que llega a cabeza de planta tiene que someterse a una serie de tratamientos físicos para que ésta se pueda tratar correctamente.

El objetivo del desbaste es:

Proteger la planta depuradora de la posible llegada de grandes objetos a cabeza de planta, los cuales podrían causar obstrucciones en las distintas unidades de tratamiento de la instalación.

También sirve para retirar fácilmente aquellas materias voluminosas que son arrastradas por la corriente, que podría disminuir la eficacia de los tratamientos y para homogeneizar el flujo que llega a cabeza de planta, así como tener un medio de expulsión del flujo de agua fuera del sistema en casos de que se supere la capacidad máxima del sistema.

Se utilizará un tanque de homogeneización, una bomba de expulsión de agua, una reja mecánica de gruesos y de finos y un tamiz rotativo.

5.1.1. Tanque de homogeneización

En plantas de tratamiento de aguas residuales las variaciones de caudal, son considerables; ya que los valores máximos y promedio además de la carga orgánica contaminante hacen indispensable el uso de tanques reguladores de caudal. La regulación u homogeneización de caudales amortigua las variaciones de caudal, de manera que se alcance un caudal de salida constante.

Las funciones que desempeña un tanque regulador de caudal son:

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

- Minimiza y controla las variaciones de caudal y características variables de las aguas residuales.
- Amortigua los flujos pico de caudal y parámetros fisicoquímicos específicos.
- Estabiliza los valores de pH.
- Brinda un flujo continuo a los sistemas de tratamiento posteriores.
- La utilización de tanques de homogeneización evita la necesidad de que las plantas de tratamiento tengan una dimensión excesiva en horarios pico. (Muñoz et al, 1995)

El tanque de homogeneización tendrá un volumen de 500 m³, de esta forma se consigue mantener un caudal medio (Q_{med}) de 150 m³/h.

Habría que colocar una bomba de Q = 150 m³/h que derivara el caudal directamente al vertido si, por razones climáticas, se sobrepasa también el nivel máximo de capacidad del tanque de homogeneización.

5.1.2. Rejas de gruesos y finos

Se utilizará una reja mecánica para la retirada de gruesos con una profundidad aproximada de 100 mm, un espesor de 14 mm y con una luz de paso de 50 mm, el ancho del canal será de 1 m y se colocarán un total de 15 barrotes. (Metcalf y Eddy, 2002).

La velocidad de entrada del agua será de 0,6 m/s, con una V_{min} de 0,4 m/s y una V_{max} de 0,8 m/s, la velocidad de paso será de 0,76 m/s.

Para la reja de finos se colocará una reja con una profundidad de 100 mm también, un espesor de 5 mm, con una luz de paso de 10 mm, un ancho de canal de 1 m y 66 barrotes.

La velocidad del agua en este caso es de 0,6 m/s, coincidiendo con la V_{min} de 0,6 m/s, una V_{max} de 0,9 m/s y una velocidad de paso a través de la reja de 0,89 m/s.

Como ambas rejas son mecánicas, la limpieza se hará de forma mecánica, arrastrando los sólidos hasta un contenedor, los residuos se llevarán a vertedero a través del gestor competente en la materia.

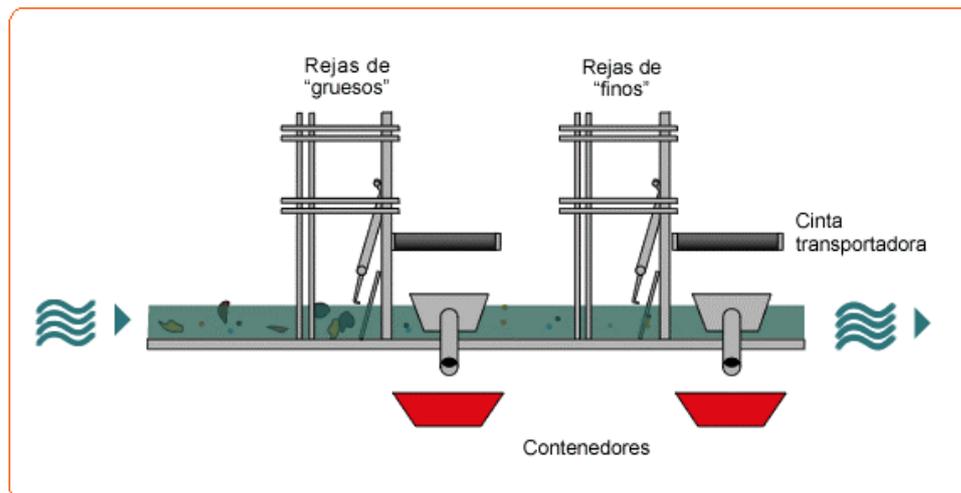


Ilustración 10: Esquema de desbaste mecanizado.

5.1.3. Tamiz rotativo

Posterior al desbaste con las rejas de gruesos y finos, se colocará un proceso de tamizado mediante un tamiz rotativo a modo de afino.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

El tamiz rotatorio es un equipo diseñado para el tamizado de líquidos. Tiene la capacidad de filtrar partículas desde 0.05 mm hasta 5 mm (en este caso para partículas de 2,5 mm de diámetro), tiene un gran rendimiento con un tamaño muy reducido ya que está constituido por un tambor dinámico y por sistemas de limpieza para quitar la saturación por exceso de sólidos.

La filtración de sólidos mediante el tamizado supone un coste menor frente a los procesos de decantación con o sin reactivos, sobre todo en aquellos procesos con menor producción de fangos.

El agua entra en el tamiz a través de la tubería de entrada de ahí se distribuye uniformemente a lo largo de todo el tambor filtrante, el cual está girando continuamente. Las partículas sólidas quedan retenidas en la superficie exterior del cilindro filtrante. Debido al giro continuo del cilindro, los sólidos depositados en él, son desplazados hacia las rasquetas, éstas son las encargadas de separarlos del cilindro filtrante y depositarlos sobre la bandeja de descarga, que les llevará hasta un contenedor de recogida (ilustración 9).

El agua se filtra a través de la malla especial de ranura continua con un perfil trapezoidal, alivia rápidamente el afluente que pasa a través de ella y finalmente el líquido pasa a la tubería de salida.

Por su diseño y por los dispositivos de auto limpieza, es un equipo preparado para trabajar de continuo con mínimo mantenimiento.

Los componentes principales son: el cilindro filtrante, el cilindro está formado por una malla de ranura continua, formando un arrollamiento helicoidal, con perfiles de sección triangular. El cuerpo, es de acero inoxidable, un rascador para retirar los sólidos de la superficie exterior del tambor y una rasqueta trasera para impedir el paso de flujo no filtrado.

El modelo elegido es el Tamiz rotativo 400/1000/304. (Filtec)



Ilustración 11: Tamiz rotativo elegido. Filtec.

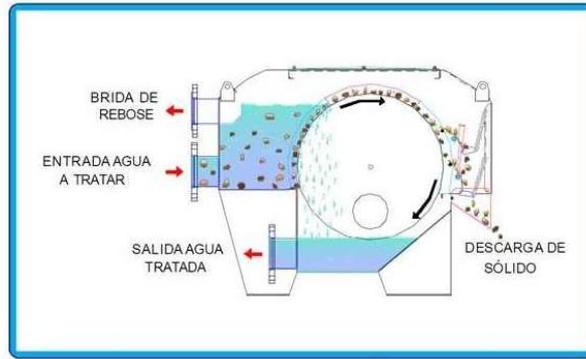


Ilustración 12: Esquema de funcionamiento del tamiz rotativo. Filtec

5.2. Tratamiento primario

El principal objetivo de los tratamientos primarios se centra en la eliminación de sólidos en suspensión (flotantes y sedimentables), consiguiéndose, una cierta reducción de la contaminación biodegradable, dado que una parte de los sólidos que se eliminan está constituida por materia orgánica.

5.2.1. Desarenador-Desengrasador

El desarenado pretende la eliminación de las arenas de un tamaño superior a 0,20 mm (entorno 0,20 a 0,21 mm) con una densidad aproximada de 1,65 kg/L, en un 85-90%. Para ello, se disminuye la velocidad del agua aumentándose la sección de paso, de manera que las partículas más pesadas se depositen en el fondo. Esto se cumplirá siempre y cuando no se supere su velocidad crítica de arrastre, la cual se puede calcular mediante la siguiente simplificación de la ley de Stokes (ilustración 10).

Por medio de la inyección de aire en el desarenador se posibilita su utilización como desengrasador, al desemulsionar las grasas y permitir la flotación de éstas. Además, se obtienen otro tipo de ventajas como la reducción de olores además de la extracción de arenas con bajo contenido en materia orgánica, los difusores se colocarán a una altura de 0,5 m en serie. Mediante una placa deflectora se crea una zona donde las grasas son acumuladas en la superficie hasta que son retiradas mediante rasqueta superficial.

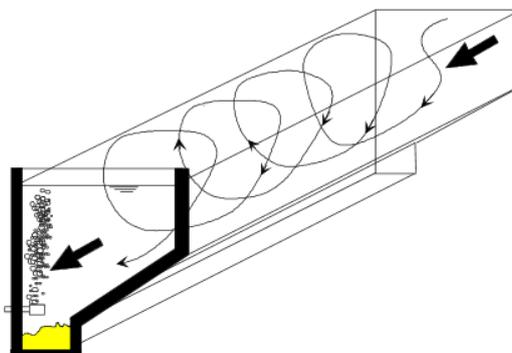


Ilustración 13: Esquema desarenador. Metcalf y Eddy, 2002.

Diámetro partícula	0,2-0,21 mm		
V sedim ideal	80 m/h		
Qmedio (Q)	150 m ³ /h		
V paso	0,3 m/h		
Carga hidráulica (u)	< 35 (m ³ /m ² *h)	10	m ³ /m ² *h
Tret	recom: 10-15 min	15	0,250min

Tabla 6: Parámetros del desarenador. (Metcalf & Eddy, 2002)

Tendrá un volumen de 37,5 m³ por el tiempo de retención, la carga y el caudal de entrada (tabla 6).

Con estas características se consigue eliminar aproximadamente 0,18 m³/d de arena y un rendimiento de eliminación de SST y DQO – DBO (eliminación de 30-50 mg/L en grasas y aceites) asociada a las grasas que se separan del 20% en todos los parámetros.

Las arenas se recogen aparte de las grasas, ya que unas son decantadas (parte inferior del tanque) y las grasas se recogen con rasqueta superficial en la parte de arriba del desarenador-desengrasador. Después se encargará el gestor correspondiente tanto para grasas como para arenas.

5.2.2. Decantador tipo Emscher

El objetivo es la decantación de sólidos en la primera parte del equipo y la digestión de éstos en la segunda parte del equipo, con lo que conseguimos, por un lado, la generación de biogás y por el otro unos fangos digeridos.

Su sección es cuadrangular, y tienen la ventaja, respecto al Imhoff de que tienen un sistema de extracción de fangos, con lo que no se colmata el sistema. (Ortega de Miguel et Al, 2010).

Estos tanques combinan en la misma unidad la sedimentación y la digestión de fangos (ilustración 11), están constituidos por dos compartimentos, en el superior se produce la decantación y en el inferior la digestión anaerobia. En el funcionamiento de los Tanques Emscher cabe distinguir dos tipos de procesos:

- *Físicos*: bajo la acción de la gravedad se separan los sólidos sedimentables presentes en las aguas residuales (que se van acumulando en el fondo del tanque), de los sólidos flotantes, incluyendo aceites y grasas (van a ir formando una capa sobre la superficie líquida de la zona de sedimentación).
- *Biológicos*: la fracción orgánica de los sólidos que se acumulan en el fondo del tanque experimenta reacciones de degradación anaerobia, licuándose, reduciendo su volumen y desprendiendo biogás, mezcla de metano y dióxido de carbono, principalmente y, en mucha menor cuantía, de compuestos del azufre (ácido sulfhídrico, mercaptanos, etc.), responsables de los olores desagradables que se desprenden.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

El compartimiento superior está delimitado por dos planos inclinados, que hacen la vez de pared inclinada del decantador. Uno de ellos solapa verticalmente al otro, con lo que impide la subida de gases a través del cuerpo de decantación (Fernández et al, 2015).

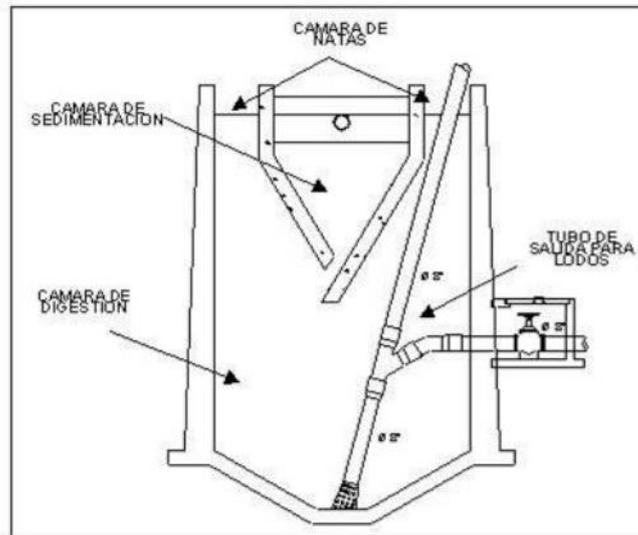


Ilustración 14: Tanque Imhoff, Omar Gallegos, 2011.

Los cálculos para el departamento de decantación se realizan de forma similar a cualquier decantador y se ven en el capítulo de dimensionamiento. El decantador conviene colocarlo antes del humedal y después del desarenador-desengrasador, para evitar la colmatación excesiva de los sólidos por las grasas.



Foto 3: Decantador Emscher de EDAR Villanubla. Rodrigo de la Fuente, 2018.



Foto 4: Superficie de Decantador Emscher de EDAR Villanubla. Rodrigo de la Fuente, 2018

Solo el volumen del decantador es de 150 m³, que estará en la parte superior del equipo (la parte inferior es la cámara de digestión de fangos).

5.3. Tratamiento secundario extensivo

El tratamiento secundario consiste en la eliminación de los contaminantes orgánicos (DBO₅, DQO), parte de los nutrientes (N y P) y SST que queden.

Las tecnologías extensivas se caracterizan porque los procesos de depuración, en los que se basan, transcurren a velocidad “natural” (sin aporte de energía) y se desarrollan en un único “reactor-sistema” (Metcalf & Eddy, 2002). El ahorro en energía se compensa con una mayor necesidad de superficie.

5.3.1. Humedales FMF

Después del decantador Emscher, mediante gravedad el agua pasara al tratamiento secundario extensivo de filtrado mediante Macrófitas en flotación (FMF).

Se han diseñado cuatro humedales de plantas Macrófitas, que ocupan el máximo espacio posible, con una superficie total de 13634,42 m², dividida en 4 humedales:

Cada humedal tendrá una sección trapezoidal, con las cabeceras rectas y las paredes y el fondo recubiertas de una lámina de geotextil (PEAD) de 2 mm de espesor (para evitar fugas de agua al subsuelo) que se anclaran en el suelo a lo largo de todas las solapas de la lámina (proyecto EDAR Villanubla).

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

El agua entrará en el primer humedal y consecutivamente irá pasando al resto de humedales, los fangos se conducirán hasta los humedales en la misma proporción y cantidad.

Una vez que el agua atraviese todos los humedales acabará en la precipitación del fosforo y de ahí a vertido.

Se realizarán excavaciones de tierras y se explanarán aguas abajo de la zona de actuación, los humedales tendrán una ligera pendiente y estarán dispuestos de forma que éstos funcionaran en serie y por gravedad, estarán comunicados por tuberías de PVC.

características de los humedales		
Superficie total	13.634,42	m ²
Superficie / Humedal	3409	m ²
numero de humedales	4	ud.
Longitud humedal (L)	41	m
Anchura humedal (W)	83	m
Profundidad humedal (h)	1,5	m

Con el humedal, se obtiene una reducción de DQO del 94 %, de DBO₅ del 94 %, los SST del 66,11 %, el N un 63 % y el P un 9,8 %.

La menor concentración de la DQO y la DBO se obtuvo con la menor cobertura y el mayor tiempo de residencia hidráulico; ya que existe poca influencia de las variables en la concentración de nitrógeno total y sólidos suspendidos totales, existiendo una respuesta significativa del fósforo total con la menor cobertura de plantas. Hubo una eliminación alta de coliformes totales, independientemente de la cobertura y a favor del mayor tiempo de residencia hidráulico (Soler et al. 2018)

5.3.2. Elección de plantas macrófitas y técnicas de manejo en humedales

Se utilizarán principalmente estos tres tipos de macrófitas, pero se pueden usar las explicadas anteriormente, también se podrían usar las Macrófitas emergentes con su correspondiente sistema de sujeción.

Typha spp (Enea o Espadaña)

Implantación: se puede realizar bien a partir de pequeñas plantas previamente desarrolladas en vivero, o directamente mediante rizomas, en función de la disponibilidad del material vegetal y de la época en que se desea realizar la implantación. Se puede realizar en cualquier época del año, mientras que para la implantación de rizomas, el momento óptimo es en primavera, justo antes de

la brotación. La distancia aconsejada entre rizomas es de aproximadamente 1 m, en FMF la altura óptima son unos 50 cm por planta y la profundidad de las raíces es hasta los 0,4 m de profundidad.

Manejo: Las plantas adultas de enea son muy rústicas y resistentes. El mantenimiento continuado de una altura de agua superior a la tolerada por las eneas tiene efectos negativos, pero la colonia podría reanudar su propagación por germinación de las semillas en el agua, o por brotación a partir de los rizomas, cuando las condiciones fueran más favorables. Hay que tener cuidado con la cantidad de fango que se añade al humedal (afecta a la parte emergente de la planta) y no tolera el sombreado prolongado (necesita luz directa). Ocasionalmente estas plantas pueden llegar a ser huésped de determinados invertebrados. (Fernández et al, 2015).

Cosecha: Hay que cosechar periódicamente y retirar del humedal la parte emergente de la colonia de eneas, para que el proceso de renovación de la colonia y remoción de carga contaminante (materia orgánica y nutrientes) sea eficaz. Si el corte se hace en plena época vegetativa puede ocurrir que no se haya completado el almacenamiento de carbohidratos de reserva en los rizomas, y que se comprometa la plantación para la siguiente temporada. Por ello es recomendable que el corte se haga una vez que las plantas estén en reposo y antes de que comience la nueva brotación. (Fernández et al, 2015).

Eichhornia crassipes (Martius) Solms (Jacinto de agua)

Implantación: Se realiza a partir de plantas individuales o renuevos, los cuales se dejan dispersos por la superficie del agua, donde hay que delimitar su superficie con una serie de redes para evitar que éstas se vayan por el efluente (algún tipo de sistema de sujeción). Estas plantas se obtienen por división de una población madre, individualizándose las agrupaciones de “rosetas” con raíces.

Manejo: Al tratarse de una planta extremadamente invasiva (desarrollo, rapidez y rusticidad) no tiene plagas o enfermedades importantes, cabe destacar que se ha intentado reducirla en zonas naturales con depredadores naturales (peces, hongos o invertebrados). A nivel de temperatura, llega a ser capaz de resistir temperaturas prolongadas durante días de 0,5 hasta -0,5 °C, pero se muere por debajo de -6°C. Por lo general las plantas usadas en estos sistemas sufren una parada vegetativa durante los periodos de invierno (sobre todo las emergentes; juncos, etc.) en donde las temperaturas bajas por debajo de 0°C, por eso se requiere una mayor superficie en invierno que en verano.

Cosecha: La remoción o retirada parcial de la población del Jacinto de agua con cierta periodicidad, es necesaria no sólo para eliminar del sistema los nutrientes captados por las plantas, sino también porque cuando hay demasiados individuos o están muy desarrollados, en la lámina de agua desciende mucho el oxígeno disuelto, se interrumpe el paso de la luz y la materia orgánica en el agua aumenta rápidamente por la pudrición de la biomasa. En climas cálidos debe realizarse la cosecha parcial de las plantas cada 3 o 4 semanas.

Lemna spp. (Lentejas de agua)

Aplicación: Se suele implantar de modo semejante a la aplicación de los jacintos de agua. La implantación de las lentejas de agua en los sistemas acuáticos de tratamiento de aguas residuales se realiza mediante la dispersión de una muestra de agua que contenga plantas, estas en condiciones favorables, colonizarán el nuevo medio rápidamente por propagación vegetativa. Por ejemplo, un único ejemplar de *L. minor*, que ocupa un área superficial aproximada de 0.12 cm², en

menos de un año puede formar una colonia que cubra una superficie de más de 1 m² de la lámina de agua.

Manejo: Las heladas pronunciadas afectan negativamente la población de lentejas de agua. Uno de los primeros efectos de las bajas temperaturas es la pigmentación rojiza de la población. Tolera bien temperaturas medias invernales de 1 a 3 °C, pero las plantas vegetan, es decir, el crecimiento de la población está interrumpido y la eficacia del sistema de tratamiento de las aguas se reduce (de ahí la distinta superficie necesaria para invierno y verano). Hay que tener cuidado con el efecto del viento sobre el sistemas. Las lentejas de agua son sensibles al viento por el pequeño tamaño de las plantas, con lo que puede ocurrir el desplazamiento de la población hacia una posición de la balsa, dejando parte de la lámina de agua al descubierto, y por tanto, reduciendo la eficacia del sistema. (Fernández et al, 2015).

Cosecha: Es necesaria la remoción parcial de la población de las lentejas de agua con una cierta periodicidad, para eliminar del sistema los nutrientes extraídos por las plantas, ya que estos se acumulan en las plantas. Máxima remoción con periodos de cosecha de 8 días (E. Å-bek y H. Hasar, 2002).

La densidad de plantas por m² que tiene que haber en los humedales se encuentra entre 10 y 50 plantas/m², recalando que el óptico se encuentra en 10 plantas/m² para macrofitas emergentes, ya que en macrofitas acuáticas el número es mayor al ser de menor tamaño. (Fernández et al, 2015).

Pero depende de la especie, época de implantación y temperatura, los datos son aproximados y sirven para hacerse una idea de las plantas que hay en el sistema, pero como se reproducen por reproducción vegetativa, una vez implantado es difícil saber el número exacto (muerte, reproducción, cosecha y mantenimiento).

5.3.3. Fijación de las plantas

Las plantas se fijan en las balsas mediante un sistema que comprende un flotador, un lastre y un dispositivo de enganche a los soportes lineales (también flotantes) que recorren los canales y mantienen inicialmente las plantas separadas a las distancias adecuadas. Como soportes lineales se pueden utilizar cuerdas de polietileno (Fernández, 2015).

Existen otras formas de fijarlas; la colocación de las plantas sobre un sistema de redes fue desarrollada por el Grupo de Agroenergética del Departamento de Producción Vegetal, Botánica, de la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid. Este sistema combina las ventajas de los humedales de flujo libre superficial y de los sistemas acuáticos. Su principal particularidad es el manejo de macrófitas emergentes como macrófitas flotantes, las cuales están soportadas en una estructura flotante que permite el entrelazado de sus raíces y órganos sumergidos, formando un tapiz filtrante que está permanentemente bañado por el agua residual (foto 8 e ilustración 15). Los mecanismos de remoción brindados por la vegetación son más eficientes, conservando procesos similares que se dan en un FWS; el flujo de agua ocurre superficialmente en estanques debidamente aislados. (Martelo et al, 2012). En el caso de las

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

macrófitas acuáticas, este sistema se cambiaría por una serie de redes de separación para evitar se desplacen por la balsa.

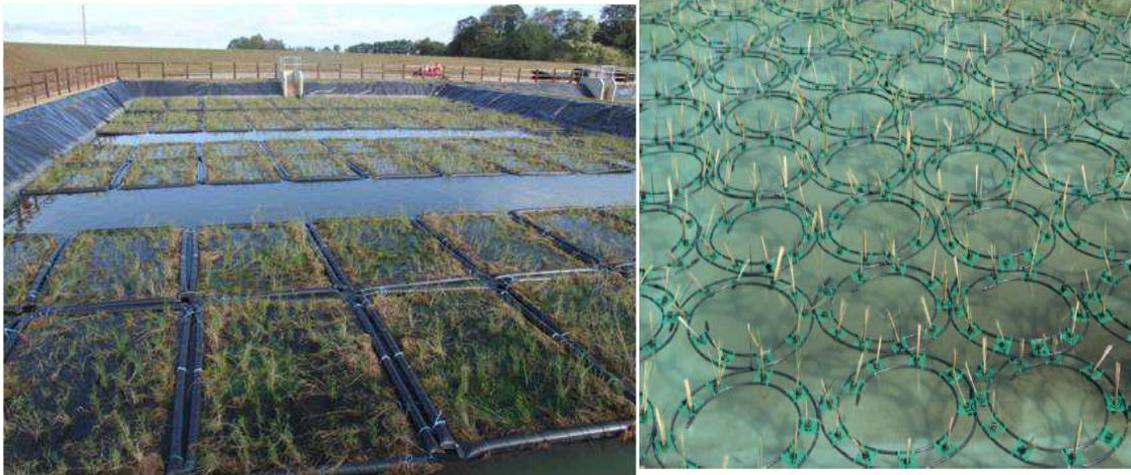


Foto 5: Sistema de FMF mediante HIDROLUTION. Naturea

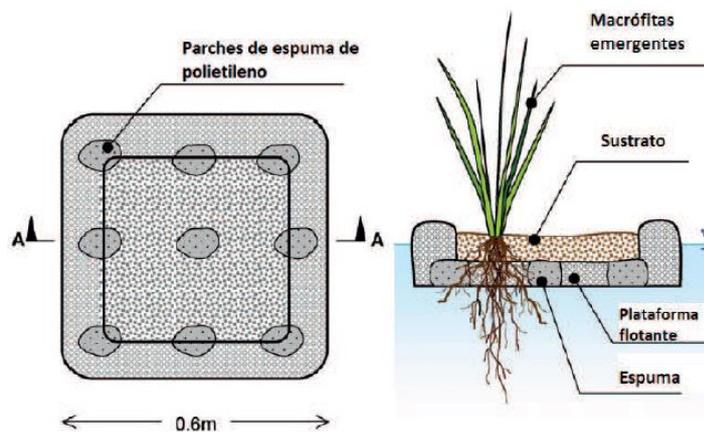


Ilustración 15: Esquema de sistema FTW para Macrófitas emergentes experimental. C. C Tanner and T. R Headley. 2011.

En las ilustraciones y fotos, se pueden diferenciar los sistemas, con y sin sustrato para las plantas. Cabe destacar que si se trata de plantas Macrófitas flotantes, no requieren de sustrato, simplemente requiere un sistema que permita mantenerlas juntas, como se ha dicho antes.

5.4. Tratamiento terciario

Se trata del último paso antes de llevar el agua a vertido, consiste en un tratamiento químico para reducir el fósforo.

5.4.1. Precipitación de fosforo

A pesar del tratamiento con las Macrófitas en flotación, el contenido de fósforo en el agua sigue siendo alto, por lo que hay que hacer una precipitación química para poder alcanzar los valores de límites de vertido.

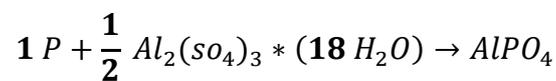
Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Se trata de un tanque donde se le añadirá un reactivo que reacciona con el fósforo para poder mantenerlo en una forma que se pueda recoger, el tanque tendrá una hélice en el centro para poder remover el agua, consiguiendo una mezcla homogénea.

Se utilizará sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) para precipitar el fósforo, mediante floculación de los agregados que se formen y posterior decantación, los “fangos” resultantes con el fósforo serán retirados y tratados por el gestor encargado. El P soluble reacciona con el Al^{+3} y se forma el $AlPO_4$ que es insoluble, al ser insoluble precipita y se puede retirar en forma de fango que, para este caso, es una corriente con elevada concentración de sólidos, los cuales son $AlPO_4$. (J. Suarez, A. Jàcome, 2007)

La adición de sulfato de aluminio hidratado en el agua formará el compuesto fosfato de aluminio ($AlPO_4$), en esta forma más manejable es la que decantará en el tanque.

La reacción estequiométrica es:



Se usará un total de 348,04 kg de $Al_2(SO_4)_3$ al día para tratar el efluente y todo ello se adicionará a un tanque circular de mezcla donde decantará el fosforo precipitado en forma de $AlPO_4$.

Un tiempo de retención hidráulica de 35 minutos, y una capacidad del tanque de 87,5 m³ para un caudal diario de 3600 m³/d.

6. BALANCES DE MATERIA Y DIMENSIONAMIENTO

6.1. Pretratamiento. Tanque de homogeneización

El tanque sirve para poder mantener el mismo caudal medio continuo, haciendo que el sistema funcione correctamente para los caudales y cantidades para los que ha sido dimensionado, evitando así posibles problemas derivados de que el caudal máximo se vea sobrepasado, como inundación, desborde de agua, derivación a vertido de ARU o colapso de la planta.

Para poder dimensionar el tanque, hay que hacerlo mediante el método del Volumen acumulado (Metcalf y Eddy, 2002).

Datos agua entrada:

Qmedio	150	m ³ /h
Qpunta	360	m ³ /h
Qmin	40	m ³ /h
Qdia	3600	m ³ /d

Diseño del tanque de homogeneización (Muñoz et al, 2004):

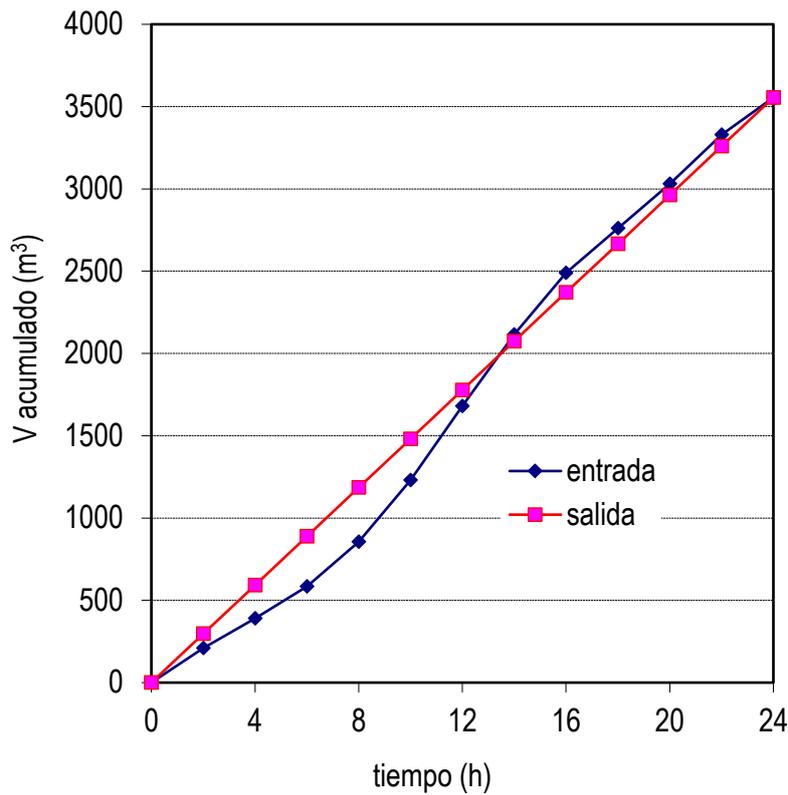
- Debe hacerse un balance del volumen de agua residual que entra al sistema de tratamiento en un intervalo de tiempo definido y se compara con el volumen de agua residual promedio (en un día), que entra al sistema de tratamiento.

$V_{Afluente} - AR < V_{AR - promedio}$; el tanque de homogeneización comienza a ser drenado

$V_{Afluente} - AR > V_{AR - promedio}$; el tanque de homogeneización se llena con exceso

Tiempo, h	% media	Caudal, m ³ /h	Vent acum (m ³)	V sal acum (m ³)	Vent-Vsal
0			0	0	0
2	70%	105,0	210,00	296,25	-86,25
4	60%	90,0	390,00	592,50	-202,50
6	65%	97,5	585,00	888,75	-303,75
8	90%	135,0	855,00	1185,00	-330,00
10	125%	187,5	1230,00	1481,25	-251,25
12	150%	225,0	1680,00	1777,50	-97,50
14	145%	217,5	2115,00	2073,75	41,25
16	125%	187,5	2490,00	2370,00	120,00
18	90%	135,0	2760,00	2666,25	93,75
20	90%	135,0	3030,00	2962,50	67,50
22	100%	150,0	3330,00	3258,75	71,25
24	75%	112,5	3555,00	3555,00	0,00
		Qmedio (m ³ /d)=	3555,00	máximo	120,00
		Qmedio (m ³ /h)=	148,13	mínimo	-330,00
				V min balsa, m³	450,00

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación



Se dimensionará con un factor de seguridad del 20% para evitar posibles situaciones en las que se supere la capacidad de tanque. Por lo tanto el tanque tendrá las siguientes características:

Parámetro	Cantidad	Ud.
V (f.seg 10%)	500	m ³
V necesario	450	m ³
W	10	m
L	10	m
H	5	m

6.2. Desbaste

6.2.1. Reja de gruesos mecánica

Se va a poner una reja para gruesos con estas características:

Espesor (ancho) de las barras de 14 mm, con una luz de paso de 50 mm, una colmatación de las rejillas del 30%, la V_{min} del agua será 0,6 m/s, mientras que la V_{max} es de 0,9 m/s.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Hay que calcular la velocidad efectiva de paso del agua a través de las rejillas:

$$V = \frac{Q}{S} * \frac{E + e}{E} * \frac{1}{C}$$

Donde:

V: La velocidad de paso a través de las rejillas, m/s.

S: Sección del campo de la rejilla, 0,1 m².

Q: El caudal que llega al desbaste, 0,042 m³/s.

E: La luz de paso o distancia entre barrotes, 50 mm.

e: Espesor o ancho de los barrotes, 14 mm.

C: Es el coeficiente de atascamiento del sistema (0,7 para rejillas limpias y 0,6 para sucias), en este caso es 0,7.

$$V = \frac{0,042 \frac{m^3}{s}}{0,1 m^2} * \frac{50 mm + 14 mm}{50 mm} * \frac{1}{0,7} = 0,76 \frac{m}{s}$$

Entonces el área útil del canal de desbaste en la zona donde está situada la rejilla se calculará con esta ecuación AR en m²:

$$AR = Bc * \frac{L}{L + b} * (1 - G\%)$$

Donde:

Bc: Ancho del canal, 1 m.

L: luz de paso o distancia entre barrotes, 0,05 m.

b: Ancho de barrotes, 0,014 m.

G: Grado de colmatación del sistema, 30%.

$$AR = 1 m * \frac{0,05 m}{0,05 m + 0,014 m} * (1 - 0,3) = 0,55 m^2$$

La profundidad en la zona de la rejilla (P) en m:

$$P = Q * \frac{b + L}{(1 - G\%) * Vp * L * Bc}$$

Donde:

Vp: La velocidad de paso del agua en la rejilla, 0,76 m/s.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

$$P = 0,76 \frac{m}{s} * \frac{14 mm + 50 mm}{(1 - 0,3) * 0,76 \frac{m}{s} * 5 mm * 1 m} = 0,1 m = 100 mm$$

El número de barrotes para gruesos que tendrá el sistema (Nº)

$$N^{\circ} = \frac{A - L}{W + L}$$

Donde:

A: Ancho del canal, 1 m.

L: Luz de paso, 0,05 m.

W: Espesor de las barras o ancho, 0,014 m.

$$N^{\circ} = \frac{1 m - 0,05 m}{0,014 m + 0,05 m} = 15 \text{ barrotes}$$

La pérdida de carga (hL) aproximada en m (Metcalf y Eddy, 2002)

$$hL = \left(\frac{1}{C}\right)^2 * \frac{Vp^2 + v^2}{2g}$$

Donde:

hL: Pérdida de carga, m.

C: Es el coeficiente de atascamiento del sistema, 0,7 (limpia).

Vp: Velocidad de paso del agua en la reja, 0,76 m/s.

v: Velocidad de llegada del agua a la reja, 0,6 m/s.

g: constante de aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$hL \text{ aprox.} = \left(\frac{1}{0,7}\right)^2 * \frac{(0,76^2) \frac{m}{s} + (0,6)^2 \frac{m}{s}}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}} = 0,016 m$$

La velocidad del agua con la pérdida estimada a través de las barras obstruidas (reduciendo el área de cribado un 50%) sería:

$$Vc = V * 2$$

Vc: velocidad a través de la barra obstruida, m/s.

V: velocidad del agua cuando atraviesa la reja, 0,76 m/s.

$$Vc = 0,76 \frac{m}{s} * 2 = 1,52 \frac{m}{s}$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Asumiendo que el coeficiente de flujo para la barra obstruida (C) es aprox. 0,6, la carga estimada sería:

$$hL = \left(\frac{1}{C}\right)^2 * \frac{Vc^2 + v^2}{2g}$$

$$hL = \left(\frac{1}{0,6}\right)^2 * \frac{(1,52^2) \frac{m}{s} + (0,6)^2 \frac{m}{s}}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}} = \mathbf{0,167\ m}$$

La pérdida de carga está en los límites aproximados (150-600 mm = 0,150-0,6 m) (Metcalf y Eddy, 2002).

Para la retirada de los sólidos resultantes del desbaste se colocarán una serie de contenedores para que se encargue el gestor competente.

6.2.2. Reja de finos mecánica

Se va a poner una reja para gruesos con estas características (Metcalf y Eddy, 2002):

Espesor (ancho) de las barras de 5 mm, con una luz de paso de 10 mm, una colmatación de las rejas del 30%, la Vmin del agua será 0,6 m/s, mientras que la Vmax es de 0,9 m/s.

Hay que calcular la velocidad efectiva de paso del agua a través de las rejas:

$$V = \frac{Q}{S} * \frac{E + e}{E} * \frac{1}{C}$$

Donde:

V: La velocidad de paso a través de las reja, m/s.

S: Sección del campo de la reja, 0,1 m².

Q: El caudal que llega al desbaste, 0,042 m³/s.

E: La luz de paso o distancia entre barrotes, 10 mm.

e: Espesor o ancho de los barrotes, 5 mm.

C: Es el coeficiente de atascamiento del sistema (0,7 para rejas limpias y 0,6 para sucias), en este caso es 0,7.

$$V = \frac{0,042 \frac{m^3}{s}}{0,1 m^2} * \frac{10\ mm + 5\ mm}{10\ mm} * \frac{1}{0,7} = \mathbf{0,89 \frac{m}{s}}$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Entonces el área útil del canal de desbaste en la zona donde está situada la reja se calculará con esta ecuación AR en m²:

$$AR = Bc * \frac{L}{L + b} * (1 - G\%)$$

Donde:

Bc: Ancho del canal, 1 m.

L: luz de paso o distancia entre barrotes, 0,01 m.

b: Ancho de barrotes, 0,005 m.

G: Grado de colmatación del sistema, 30%.

$$AR = 1 \text{ m} * \frac{0,01 \text{ m}}{0,01 \text{ m} + 0,005 \text{ m}} * (1 - 0,3) = \mathbf{0,47 \text{ m}^2}$$

La profundidad en la zona de la reja (P) en m:

$$P = Q * \frac{b + L}{(1 - G\%) * Vp * L * Bc}$$

Donde:

Vp: La velocidad de paso del agua en la reja, 0,89 m/s.

$$P = 0,89 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{5 \text{ mm} + 10 \text{ mm}}{(1 - 0,3) * 0,89 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 10 \text{ mm} * 1 \text{ m}} = \mathbf{0,1 \text{ m} = 100 \text{ mm}}$$

El número de barrotes que tendrá el sistema de rejillas para finos (N°):

$$N^{\circ} = \frac{A - L}{W + L}$$

Donde:

A: Ancho del canal, 1 m.

L: Luz de paso, 0,01 m.

W: Espesor de las barras o ancho, 0,005 m.

$$N^{\circ} = \frac{1 \text{ m} - 0,01 \text{ m}}{0,005 \text{ m} + 0,01 \text{ m}} = \mathbf{66 \text{ barrotes}}$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

La pérdida de carga (hL) aproximada en m (Metcalf y Eddy, 2002)

$$hL = \left(\frac{1}{C}\right)^2 * \frac{Vp^2 + v^2}{2g}$$

Donde:

hL: Perdida de carga, m.

C: Es el coeficiente de atascamiento del sistema, 0,7 (limpia).

Vp: Velocidad de paso del agua en la reja, 0,89 m/s.

v: Velocidad de llegada del agua a la reja, 0,6 m/s.

g: constante de aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$hL \text{ aprox.} = \left(\frac{1}{0,7}\right)^2 * \frac{(0,89^2) \frac{m}{s} + (0,6)^2 \frac{m}{s}}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}} = \mathbf{0,032 m}$$

La velocidad del agua con la perdida estimada a través de las barras obstruidas (reduciendo el área de cribado un 50%) sería:

$$Vc = V * 2$$

Vc: velocidad a través de la barra obstruida, m/s.

V: velocidad del agua cuando atraviesa la reja, 0,89 m/s.

$$Vc = 0,89 \frac{m}{s} * 2 = \mathbf{1,78 \frac{m}{s}}$$

Asumiendo que el coeficiente de flujo para la barra obstruida (C) es aprox. 0,6, la carga estimada sería:

$$hL = \left(\frac{1}{C}\right)^2 * \frac{Vc^2 + v^2}{2g}$$

$$hL = \left(\frac{1}{0,6}\right)^2 * \frac{(1,78^2) \frac{m}{s} + (0,6)^2 \frac{m}{s}}{2 * 9,8 \frac{m}{s^2}} = \mathbf{0,241 m}$$

La pérdida de carga está entre los valores aproximados.

6.2.3. Tamiz rotativo

Se pondrá un tamiz de tambor rotativo para finar el efluente antes de llegar al desarenador-desengrasador y al decantador Emscher.

Según las tablas por tipo de tamiz y a partir de la superficie de cribado, tenemos varias opciones.

tipo de tamiz	Superficie de cribado			
	Tamaño	mm	material	aplicación
<i>Inclinado (fijo)</i>	medio	0,25-2,5	Acero inoxidable de alambre	Trat. Primario
<i>Tambor rotativo</i>	gruesos	2,5-5	Acero inoxidable de alambre	Desbaste
	medio	0,25-2,5	Acero inoxidable de alambre	Trat. Primario
	finos	6-35	Acero inox. Y tela de polyester	Trat. Secund. y de SS
<i>Oscilador horizontal</i>	medio	1,6-4	Barras de acero inoxidable	sobre flujo y tanque de tormenta
<i>Tangencial</i>	finos	1200	Malla de acero inoxidable	Combinado. Tanque tormenta

Tabla 7: Tipos de tamiz, Metcalf y Eddy, 2002.

Se elegirá uno que sea capaz de retirar los sólidos finos que son capaces de traspasar tanto las rejillas de gruesos como de finos, de esta forma poder afinar el efluente que llega al Desarenador-Desengrasador y también aligerar la carga del decantador, por lo tanto se elegirá el tamiz de tambor rotativo de tamaño medio (tabla 7).

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Comparación de distintos modelos de criba:

tipo de criba	luz de paso (mm)	DBO %	SST %
Parabólico fijo	1,6	5-20 %	5-30 %
Tambor rotativo	0,25	25-30 %	25-45 %
Rendimiento		25 %	35 %

Al elegir el tambor de tipo rotativo se consiguen unos rendimientos de eliminación de DBO además de los SST.

Se elegirá la criba de tambor rotativo, ya que tiene mejores rendimientos.

El modelo elegido es el Tamiz rotativo 400/1000/304:

Datos técnicos:

- Luz de paso, 2,5 mm.
- Diámetro cilindro 400 mm.
- Longitud cilindro 1000 mm.
- Potencia motor kw 0,75
- Ancho total 1280 mm.
- Fondo total 840 mm.
- Altura total 740 mm.
- AISI 304.
- Caudal según luz de paso a 2,5 mm, $Q_{max} = 203 \text{ m}^3/\text{h}$.

Perdida de carga (hL) (Metcalf y Eddy, 2002):

$$hL = \frac{1}{2 * g} * \left(\frac{Q}{C * A} \right)^2$$

Donde:

Q: Caudal de entrada al tamiz, $0,042 \text{ m}^3/\text{s}$.

g: Aceleración de la gravedad, $9,8 \text{ m/s}^2$.

C: Coeficiente de descarga, 0,6.

A: Área inundada del tambor: $(\pi r^2 = 0,125 \text{ m}^2)$

$$hL = \frac{1}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} * \left(\frac{0,042 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,6 * 0,125 \text{ m}^2} \right)^2 = 0,016 \text{ m}$$

Balance de materia hasta tamiz (pretratamiento y desbaste):

Unidades	DQO1	DBO1	SST1	DQO2	DBO2	SST2
mg/L	440	240	360	440	180	234
kg/m ³	0,44	0,24	0,36	0,44	0,18	0,234
Kg/d	1584	864	1254	1188	648	940,5
Q1 (m ³ /h)	150			Q2 (m ³ /h)	150	

6.3. Tratamiento primario

6.3.1. Desarenador – Desengrasador

El desarenado pretende la eliminación de las arenas de un tamaño superior a 0,20 mm (entorno 0,20 a 0,21 mm) con una densidad aproximada de 1,65 kg/L, en un 85-90%. Para ello, se disminuye la velocidad del agua aumentándose la sección de paso, de manera que las partículas más pesadas se depositen en el fondo. Para la eliminación del 95% de las partículas mayores de 0,2 mm con una densidad de 2,6 = eliminación del 75% de las partículas mayores de 0,15 mm.

Los parámetros de diseño utilizados en el dimensionamiento del desarenado-desengrasado han sido los siguientes:

Carga hidráulica a caudal máximo ≤ 35 m³/m²*h

Carga hidráulica a caudal medio ≤ 15 m³/m²*h

Tiempo de retención hidráulica a caudal punta ≥ 10 min.

Tiempo de retención hidráulica a caudal medio ≥ 15 min.

El tiempo recomendado está entre 10-15 min.

La carga hidráulica definirá la superficie longitudinal de la unidad:

$$C_H = \frac{Q_{Unitario} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)}{S \text{ (m}^2\text{)}}$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Donde:

Qunitario: Caudal medio de llegada, 150 m³/h.

S: Sección longitudinal del desarenador-desengrasador, W*L (ancho * largo).

$$C_H = \frac{150 \frac{m^3}{h}}{(2,5 * 6) m^2} = 10 m^3/m^2 * h$$

El volumen del desarenador vendrá dado por los tiempos de retención mínimos establecidos:

$$V \left(\frac{m^3}{h} \right) = \frac{Q_{Unitario} \left(\frac{m^3}{h} \right)}{t_R(h)}$$

Donde:

Tret: 15 min = 0,010 d, como tiempo recomendado en desarenador-desengrasador para una eliminación de arenas y grasas óptima.

Qunit: 150 m³/h o 3600 m³/d.

$$V = \frac{3600 m^3/d}{0,010 d} = 37,5 m^3$$

Las dimensiones establecidas se encuentran dentro de los rangos habituales empleados en el diseño de este tipo de desarenadores-desengrasadores:

Altura útil entre 2 y 5 m.

Relación longitud / anchura: 2,5:1 - 5:1 o Relación anchura / altura útil: 1:1 - 5:1

Se tomará una relación anchura / altura útil de 1:1, con las siguientes dimensiones:

Hay que sobredimensionar un tanto por ciento del Largo a la entrada y la salida (% en total) del tanque para evitar zonas en las que no exista suficiente flujo y velocidad para que el sistema funcione correctamente, se suele poner un factor de seguridad del 30%. (Metcalf y Eddy, 2002.).

A (sección)	W*H (1:1)	15	m ²
W	2,5		m
H	2,5		m
L	7,8		m
V (volumen)	37,5		m ³

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Datos informativos teóricos y calculados.

Diámetro partícula	0,2-0,21	mm	0,00021	m
V sedim ideal	80	m/h	0,02	m/s
Qmedio (Q)	150	m ³ /h		
V paso	0,3	m/h		
Carga hidráulica (u)	< 35 (m ³ /m ² *h)	10	m ³ /m ² *h	
Tret	recom: 10-15 min	15	min	0,250 h

Tabla 8: Datos desarenador-Desengrasador, Metcalf y Eddy, 2002.

Se requiere la colocación de unos difusores de aire a cierta altura para poder realizar la tarea del desarenador-desengrasador, a una altura de entre 0,5 m y 0,9 m.

Los difusores se colocarán a una distancia del fondo de 0,5 m.

El caudal de aire necesario para poder retirar las partículas y arenas de hasta 0,21 mm de diámetro es aproximadamente; Qaire 0,5-2 m³/h (Metcalf y Eddy, 2002).

Se tomará como dato un caudal Qaire de 0,5 m³/h, según el tiempo de retención del tanque (15 min = 0,250 h) habrá un total de 0,125 m³/h de aire cada 15 minutos de tratamiento, 0,5 m³/h y 12 m³/d a lo largo de 24 horas.

El desarenador desengrasador aireado tiene un rendimiento de eliminación de grasas de hasta el 80%, La DQO se incrementa en un 20 a 30%, por las grasas contenidas en los vertidos (A. Hernández, A. Hernández, P. Galán, CIDTA USAL.) también la eliminación de 30 a 50 mg/L en grasas y aceites, constituye un 20% de eliminación de DBO, por lo tanto el sistema tomará un rendimiento de eliminación de DQO y DBO del 20%, derivado de las grasas contenidas en el agua.

La cantidad de arena que hay en un agua residual urbana o rural es aproximadamente de 0,05 m³ de arena/1000 m³ agua (Metcalf y Eddy, 2002.)

Por lo tanto el volumen aproximado (teórico) de arena que hay por hora en el tanque será de:

$$\text{Volumen de arena (m}^3\text{)} = 0,05 \text{ m}^3 * 150 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,0075 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ de arena} = 0,18 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

<u>Rendimiento arena</u>	0,0075 m³/h de arena
<u>Arena depositada</u>	0,18 m³/d

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

La arena se extraerá mediante un sistema de una bomba de extracción.

Tendrá una rasqueta superficial para poder retirar las grasas que quedan en flotación (funcionamiento se explica en el apartado Selección de alternativas).

Tiene un rendimiento de eliminación de sólidos SST del 20% (Metcalf y Eddy, 2002.).

SST in 940,545 kg/d

SST out 752,436 kg/d

Balance de materia al desarenador-desengrasador (1º tratamiento primario):

Unidades	DQO2	DBO2	SST2	DQO3	DBO3	SST3
mg/L	440	180	234	352	144	187,2
kg/m ³	0,44	0,18	0,234	0,352	0,144	0,1872
Kg/d	1188	648	940,545	950,4	518,4	752,436
Q2 (m ³ /h)	150			Q3 (m ³ /h)	150	

6.3.2. Sedimentación primaria. Sedimentador “tipo Emscher”

El agua entra en el sistema (Q3), el efluente clarificado (Q4) sale del decantador, a la vez que se genera biogás a partir de los sólidos y lo que no llega a digerirse son los fangos.

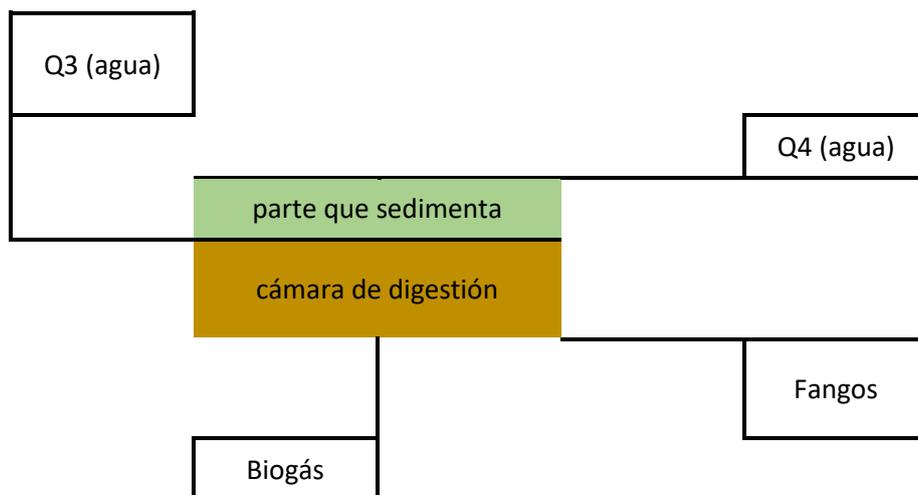


Ilustración 16: Esquema de diseño del decantador-digestor Emscher, Rodrigo de la Fuente

Datos del decantador Emscher (Fernández et al, 2015).

zona de sedimentación		
Tret	1-4.	h
Carga superficial	1-2.	m ³ /m ² /h
Carga vertedero	250	m ³ /m/d
% elim. SST	45-65	%
% elim. DBO	25-35	%
zona de digestión		
Cap. Digest.	30-90	L/persona
Tiempo almacenaje fangos	3-12.	meses

Tabla 9: Características de decantador Emscher, Fernández, 2015).

Cálculos de diseño de la cámara de sedimentación:

Tomando como dato principal una carga superficial ($Ch_{superficial}$ ó u) de 2 m³/m²/d y el caudal de entrada al decantador $Q_{entrada}$ de 150 m³/h (tabla 9), se calcularán los demás datos.

Área del sedimentador:

$$A_{sed} = \frac{Q \left(\frac{m^3}{h} \right)}{u \left(\frac{m^3}{m^2/h} \right)}$$

Donde:

Q: Caudal de entrada, 150 m³/h.

u: Carga superficial, 2 m³/m²/d.

$$A_{sed} = \frac{150 \left(\frac{m^3}{h} \right)}{2 \left(\frac{m^3}{m^2/h} \right)} = 75 \text{ m}^2$$

El volumen del sedimentador (Metcalf y Eddy, 2002.):

$$Tret(h) = \frac{V(m^3)}{Q \left(\frac{m^3}{h} \right)}; V = Tret(h) * Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$$

$$V = 1(h) * 150 \left(\frac{m^3}{h} \right) = 150 \text{ m}^3$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Chsuperficial	2	m ³ /m ² /h	Dimensiones de zona sedimentación		
Qentrada	150	m ³ /h	W	5	m
Area (sedimentador)	75	m ²	L	15	m
Volumen sedimentador	150	m ³	H	2	m
Tret	1	h	V	150	m ³

Una calculadas las dimensiones del sedimentador, hay que calcular la longitud extra de seguridad para evitar zonas en las que la velocidad disminuya, se toma un factor de seguridad del 30%, como en el desarenador-desengrasador:

Qmax diario	3600	m ³ /d
Chvertedero	250	m ³ /m*d
Lv (30%)	4,5	m
Ltotal)	19,5	m

La longitud se incrementa hasta los 19,5 m, 4,5 m más entre la entrada y la salida del sedimentador.

Cálculos de diseño de la cámara de digestión:

Una vez dimensionada la cámara de sedimentación, hay que calcular los datos y dimensiones de la cámara de digestión, que será la encargada de digerir los fangos resultantes.

fcr a 20°C	0,7	
Volum. Digest (Vd)	585,23	m ³

Para calcular el volumen de la cámara de digestión:

$$Vd = \frac{Cdig * h.e * FCR}{1000 L/m^3}$$

h.e: habitantes equivalente, 13934 h.e.

Cdig; Capacidad de digestión: De este tipo de digestor va de 30-90 L/persona, se tomará un valor medio de 60 L/persona (Jesús Fernández González et al, 2015).

Fcr a 20°C. Constante de digestión a temperatura de referencia, 0,7.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

$$Vd = \frac{60 \frac{L}{\text{persona}} * 13934 \text{ h.e} * 0,7}{1000 \text{ L/m}^3} = 585,23 \text{ m}^3$$

El tiempo teórico de digestión de lodos con una temperatura de referencia de 20°C es de 40 días.

Las dimensiones aproximadas de la cámara de digestión

Dimensiones cámara de digestión		
W	4,9	m
L	15	m
H	8	m
V	588	m ³

Contando con el factor de seguridad para alargar la entrada y la salida.

Lv (30%)	4,5	m
Ltotal (m)	19,5	m

Cálculos de generación de biogás:

Para la generación de biogás se va a tener en cuenta en función de los Kg de DQO que son eliminados, teniendo en cuenta que el rendimiento de digestión será del 70%, es decir, un 70% de los lodos se digieren y se transforman en biogás, el 30% restante se queda como lodo, del que se hablará más adelante.

Para saber los kg DQOe se puede hacer haciendo el balance de materia de la DQO que entra con la DQO eliminada, el resultante será el 100% de la DQO que se elimina.

$$DQOe = DQO3 - DQO4 = (\text{kgDQOe/d})$$

$$DQOe = 1267,20 \frac{\text{kgDQO}}{d} - 887,04 \frac{\text{kgDQO}}{d} = 380,16 \text{ kgDQO/d}$$

Se parte de la relación de 0,35 m³ CH₄/Kg DQOe (Metcalf y Eddy, 2002.)

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

$$\mathbf{Biogas} = 0,35 \frac{m^3 CH_4}{KgDQOe} * 380,16 \frac{kgDQO}{d} = \mathbf{133,056 Nm^3 CH_4/d}$$

133,056 Nm³ CH₄/d sería si hubiera un rendimiento del 100%, pero esa transformación no ocurre, por lo tanto:

Rendimiento 70% digestión.

133,056 Nm³ CH₄/d

$$\mathbf{Biogas (70\%)} = 133,056 \frac{Nm^3 CH_4}{d} * 0,7 = \mathbf{93,14 \frac{Nm^3 CH_4}{d}}$$

Según los valores típicos de composición del biogás:

Porcentaje	Tipo	Cantidad	Unidades
70%	CH ₄	93,1392	Nm ³ CH ₄ /d
30%	CO ₂	39,9168	Nm ³ CO ₂ /d
100%	biogás	133,056	Nm ³ biogás/d

Por lo tanto el biogás resultante sería 133,056 Nm³ biogás/d o 5,54 Nm³ biogás/h, dada la cantidad generada al día existen dos opciones para manejar la emisión del biogás generado a la atmosfera:

1º: Si se encuentra un quemador comercial para esas cantidades, se colocaría para quemar el biogás.

2º: Si no hubiera uno en el mercado o su coste de mantenimiento o de implantación fuera excesivo, entonces se emitiría a la atmosfera sin tratamiento previo.

Cálculos de generación de fangos:

Como el rendimiento del digestor es el 70%, queda un 30% sin digerir, que son los fangos generados. El rendimiento de eliminación de SST es del 50-60%, se toma el valor de eliminación del 60%.

Para saber fangos derivados de los sólidos, se puede calcular directamente mediante el rendimiento de eliminación de sólidos del decantador Emscher (60% de eliminación de sólidos):

$$\mathbf{Fangos \left(\frac{kg}{d} \right)} = 3600 \frac{m^3}{d} * 0,1872 \frac{kg}{m^3} * 0,6 = \mathbf{404,35 \frac{kg}{d}}$$

Como se ha dicho antes, no todos los SST que decantan son fangos, ni son digeridos en su totalidad, como el rendimiento de digestión es de 70%, los sólidos que quedan son el 30%. La cantidad de fangos generados en realidad sería:

$$\text{Fangos } \left(\frac{\text{kg}}{\text{d}} \right) = 404,35 \frac{\text{kg}}{\text{d}} * 0,3 = 121,30 \frac{\text{kg}}{\text{d}}$$

Sólidos generados		Fangos extraídos	
404,352	kg/d	121,3056	Kg/d
0,11232	kg/m3	0,033696	kg/m3
2,69568	kg/m3*d	0,808704	kg/m3*d

Tabla resumen de fangos generados:

	<u>kg/d</u>	<u>kg/m3</u>	<u>kg/m3.d</u>
Fangos total	121,3056	0,033696	0,808704

Los fangos se incorporarán a los humedales, la cantidad que irá a cada humedal será la misma, ya que los humedales no generan apenas fangos y en los humedales se irá degradando la materia orgánica que quede.

Rendimiento de eliminación Emscher		
<u>DQO</u>	<u>DBO</u>	<u>SST</u>
<u>20-30%</u>	<u>25-35%</u>	<u>50-60%</u>
<u>30%</u>	<u>30%</u>	<u>60%</u>

Balance de materia del decantador Emscher:

Unidades	DQO3	DBO3	SST3	DQO4	DBO4	SST4
mg/L	352,00	144,00	187,20	246,40	100,80	74,88
kg/m ³	0,35	0,14	0,18	0,24	0,10	0,07
Kg/d	1267,20	518,40	673,92	887,04	362,88	269,56
Q3 (m ³ /h)	150			Q4 (m³/h)	150	

6.4. Tratamiento secundario extensivo. Humedales FMF.

Para poder dimensionar los humedales, se tiene que hacer en base a la DBO y a partir de ahí ya se van calculando los rendimientos y las necesidades para poder eliminar los otros contaminantes.

Dimensionamiento biológico

Los cálculos se harán en función de la DBO y en la estación de invierno, ya que las necesidades y los rendimientos son diferentes en verano y en invierno, después se hará un promedio entre las dos etapas, que será el rendimiento medio real que se ven en los resultados teóricos.

Para conocer la superficie necesaria de humedal de Macrófitas en flotación, se empleará la fórmula de (Ortega de Miguel et al., 2010).

$$S = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right)}{K_t * h * \varphi_a}$$

Donde:

S: Superficie necesaria del humedal (m²).

Q: Caudal de alimentación (3600 m³/d).

C_i: Concentración del contaminante en el influente (100,8 mg/L).

C_e: Concentración del contaminante en el efluente (10,08 mg/L), según un rendimiento del 90%.

K_t: Constante de reacción dependiente de la temperatura (d⁻¹).

h: Profundidad media de la lámina de agua (1,5 m).

ϕ_a: Porosidad del sustrato filtrante (0,8 sistema TFT de georedes).

Los valores de θ_R, K_R o ϕ_a han sido obtenidos de tablas de (Ortega de Miguel et al., 2010).

Contaminación a eliminar		DBO ₅	NH ₄ ⁺ nitrificación	NH ₄ ⁺ desnitrificación
Humedales Artificiales de Flujo Superficial	K _R (d ⁻¹)	0,678	0,2187	1
	θ _R	1,06	1,048	1,15
Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	K _R (d ⁻¹)	1,104	0,01854 + 0,3922 (h _t) ^{2,6077}	1
	θ _R	1,06	1,048	1,15

Tabla 10: valores de K_R y θ_R, para humedales, Manual depuración para poblaciones pequeñas, MAPAMA.

El cálculo de la superficie requerida del humedal se realiza tanto para el caso en el que las temperaturas son más bajas (es decir, para las condiciones de invierno), como para el caso en el que las temperaturas son más elevadas (condiciones de verano) y se dimensiona con la mayor de las superficies obtenidas en los dos casos, aunque los rendimientos sean diferentes, ya que no se puede realizar dos obras independientes para invierno y verano, no es sostenible.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Para conocer K_t se emplea:

$$K_t = K_r * \theta_R^{(T_w - T_r)}$$

Donde:

K_r : Constante de reacción a la temperatura de referencia = $K_{20} = 0,678 \text{ d}^{-1}$ para humedales de flujo superficial.

T_w : Temperatura del agua considerada en el diseño, Invierno = 15 °C y Verano = 25 °C.

T_r : Temperatura de referencia a la que se ha calculado el coeficiente 20 °C

θ_R : Coeficiente de temperatura (adimensional), 1,06 (para la temperatura 20 °C).

La constante de velocidad se calcula del siguiente modo (Lara, 1999):

$$K_t = 0,678 * 1,06^{(T_w - 20)}$$

Para invierno:

$$K_{\text{invierno}} = 0,678 * 1,06^{(15 - 20)}$$

$$K_{\text{invierno}} = 0,507 \text{ d}^{-1}$$

Para verano:

$$K_{\text{verano}} = 0,678 * 1,06^{(25 - 20)}$$

$$K_{\text{verano}} = 0,907 \text{ d}^{-1}$$

Una vez calculada la K_t para invierno y verano se calculará la superficie necesaria (S) para reducir la DBO hasta 10,08 mg/L, es decir, un 90%.

$$S = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_i}{C_e}\right)}{K_t * h * \varphi_a}$$

- Invierno:

$$S_{\text{Invierno}} = \frac{3600 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * \ln\left(\frac{100,8}{10,8}\right) \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{0,507 * 1,5 \text{ m} * 0,8} = 13634,42 \text{ m}^2$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

- Verano:

$$S_{\text{Verano}} = \frac{3600 \frac{m^3}{d} * \ln\left(\frac{100,8}{10,8}\right) \frac{mg}{L}}{0,907 * 1,5 m * 0,8} = 7613,39 m^2$$

Se obtiene una mayor superficie en invierno debido a que el humedal artificial funciona mejor con temperaturas ambientales altas y tiene un mayor rendimiento de eliminación de los contaminantes con temperaturas altas, por lo que es necesaria una superficie menor que en los meses de invierno, en zonas donde la temperatura media anual fuera más alta y las fluctuaciones invierno-verano no fueran significativas, siendo estas altas durante todo el año, el rendimiento de eliminación de la DBO₅ sería mucho mayor, por lo que estos sistemas son más eficientes en zonas calurosas.

Se elige la superficie más grande, ya que hay que tomar la que mayor superficie necesite, pero el problema es que los 13.634,42 m² son demasiados como para hacer un único humedal de esas dimensiones, hay que optar por dividirlo en humedales de menor superficie, estando estos dispuestos en línea.

Es muy importante para evitar problemas de colmatación el comprobar que no se supere la carga orgánica superficial del humedal, según el CENTA (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua), se recomienda que la carga orgánica esté situada entre 20 gDBO₅/m²*d y 30 gDBO₅/m²*d, pero también se puede tomar valores menores de 20 gDBO₅/m²*d. los datos han sido comprobados de forma experimental en la EDAR Alcantarí-Norte, donde se ha puesto la tecnología de humedales artificiales de flujo superficial y se han obtenido buenos rendimiento con dichos valores de carga orgánica superficial.

Carga orgánica superficial (C_{org}):

$$C_{org} = \frac{Q \left(\frac{m^3}{d}\right) * DBO_i \left(\frac{mg}{L}\right)}{S (m^2)}$$

$$C_{org} = \frac{3600 * 100,8}{13634,42} = 26,61 \frac{gDBO_5}{m^2 * d}$$

Está entre 20 y 30 gDBO₅/m²*d, por lo tanto está dentro de los valores que se consideran óptimos para el humedal.

Como se ha dicho antes, el problema es que los 13.634,42 m² son demasiados como para hacer un único humedal, hay que dividirlo en humedales de menor superficie dispuestos en línea.

Se ha optado por dividir la superficie en 4 humedales, cada humedal tendría una superficie de; 3408,60 m² en invierno y de 1903,35 m² en verano.

Por lo tanto, con una superficie de 3408,60 m² hay que diseñarlo con una relación (ancho-largo) W: L adecuada para este tipo de humedales, que es de 1:1 a 1:5 (Ortega de Miguel et al., 2010).

Se va a diseñar según la relación de 1:2, con lo que tendrán las siguientes dimensiones según esta relación:

$$S = W * L = 2W^2$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

	Calculado	Real (redondeado)
W (ancho)	41,28 m	41 m
L (largo)	82,57 m	83 m
Superficie	3408,6 m ²	3409 m²

Según el Manual de Fitodepuración de la Universidad Politécnica de Madrid, (Fernández et al, 2015) la superficie de plantación requerida es de 1-3 m²/h.e:

Habitantes equivalente (h.e)	13934
Superficie humedal (m ²)	13634,42
Superficie de plantación (m ² /h.e)	1 (se cumple)

Datos de diseño:

Características de los humedales		
Superficie total	13.634,42	m ²
Superficie / Humedal	3409	m ²
numero de humedales	4	Ud.
Longitud humedal (L)	41	m
Anchura humedal (W)	83	m
Profundidad humedal (h)	1,5	m

Rendimientos estimados del humedal

Conocida la superficie del humedal que se va a construir a continuación se realizará una estimación de los rendimientos estimados para la reducción en el sistema de la demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos (SST), el nitrógeno (N) y el fósforo (P).

DBO₅ (Demanda biológica de oxígeno)

El rendimiento de eliminación de la DBO₅ en un sistema de flujo superficial de Macrófitas en flotación, puede ser calculado a través de la siguiente ecuación (Lara, 1999):

$$C_e = e^{-K_t * T_{ret}} * C_o$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Donde:

C_e : Concentración de DBO5 en el efluente, (mg/L)

C_o : Concentración de DBO5 en el afluente, (mg/L)

K_t : Constante dependiente de la temperatura, (d^{-1})

T_{ret} : Tiempo de retención hidráulico. (d)

La concentración de sustrato en el afluente ya ha quedado establecida anteriormente. La constante de velocidad también fue determinada anteriormente, para invierno y verano:

$$K_{invierno} = 0,507 d^{-1}$$

$$K_{verano} = 0,907 d^{-1}$$

El tiempo de retención hidráulico del humedal (T_{ret} o t'), es decir, de toda la superficie, independientemente de las divisiones, se puede calcular con la fórmula de (Lara, 1999):

$$T_{ret} = \frac{V * \varphi_a}{Q}$$

Donde:

V: Volumen del sistema, en m^3 ; es $W*L*h = 20451,62 m^3$.

φ_a : La porosidad del medio, (0,8).

Q: Caudal diario, ($3600 m^3/d$).

$$T_{ret} = \frac{20451,62 * 0,8}{3600} = 4,54 \text{ dias} < 15 \text{ dias}$$

Estaría un total de 4,54 días en todos los humedales, en cada humedal se calcula del mismo modo, pero cambiando el volumen total por el volumen de un humedal:

V: $41 m * 83 m * 1,5 m = 5115,90 m^3$

$$T_{ret/humedal} = \frac{5115,90 * 0,8}{3600} = 1,14 \text{ dias}$$

Al ser 4 humedales, la suma de sus tiempos daría el T_{ret} total.

Se considera la porosidad del medio igual a 0.8 porque la velocidad y los flujos son muy lentos en la entrada al humedal y asignamos este valor de porosidad para que el sistema funcione del lado de la seguridad ya que su vegetación son las Macrófitas en flotación.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Velocidad del flujo en cada humedal:

$$v_{flujo} = \frac{L}{T_{ret}}$$

$$v_{flujo} = \frac{41 \text{ m}}{4,54 \text{ d}} = 18,17 \frac{\text{m}}{\text{d}} = 2,1 * 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Conocidos ya todos estos datos, se puede calcular la eliminación de DBO₅ para el sistema, a partir de esta ecuación ya usada antes, tanto para invierno como para verano:

$$C_e = e^{-K_t * T_{ret}} * C_o$$

$$C_{e,Invierno} = e^{(-0,507 * 4,54)} * 100,8 = 10,08 \frac{\text{mgDBO}}{\text{L}}$$

$$C_{e,Verano} = e^{(-0,907 * 4,54)} * 100,8 = 1,63 \frac{\text{mgDBO}}{\text{L}}$$

Por tanto los rendimientos teóricos de DBO₅ son:

Reducción			Rendimiento teórico Inv-Verano		
Ce, Invierno	10,08	mgDBO/L	RDBOinv.	90,0	%
Ce, Verano	1,631596765	mgDBO/L	RDBOver.	98,4	%
Ce media	5,855798383	mgDBO/L	RDBO promedio	94,2	%

Por lo tanto, se produce una reducción de la DBO₅ del **94,2 %** en el efluente, según la media entre invierno y verano.

DQO (Demanda química de oxígeno)

Como no sabemos con datos de laboratorio la relación entre la DBO/DQO, ésta relación se puede estimar de forma teórica a través de las concentraciones de DBO y DQO del influente que llega a los humedales. Teóricamente se puede aceptar que aproximadamente la relación DBO/DQO es del 60%, se va a calcular dicha relación con las concentraciones que llegan al humedal:

$$r = \frac{DBO}{DQO} * 100 = \frac{100,8}{246,4} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 40,91 \%$$

Según esta relación la concentración de DQO (mg/L) del efluente de los humedales será:

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Invierno:

$$C_{e,Invierno} = \frac{(DBO_{e,Invierno})}{r} * 100$$

$$C_{e,Invierno} = \frac{10,8}{40,91} * 100 = 24,64 \text{ mg/L}$$

Verano:

$$C_{e,Verano} = \frac{1,63}{40,91} * 100 = 3,99 \text{ mg/L}$$

Por lo tanto, los rendimientos serán:

Eliminación de DQO					
relación DBO/DQO (r)	40,91	%	RDBOinv.	90	%
Ce, Invierno	24,64	mgDQO/L	RDBOver.	98,38	%
Ce, Verano	3,99	mgDQO/L	RDBO promedio	94,19	%

Por lo que el rendimiento de eliminación de la DQO en el humedal será del **94,19 %** en el efluente.

SST (Sólidos en suspensión totales)

La eliminación de sólidos suspendidos totales se debe a los procesos físicos, y sus resultados están únicamente influidos por la temperatura, a través de los efectos de la viscosidad del agua.

Sin embargo, en el caso de estudio, dadas las características del sistema puede asumirse que los efectos de la viscosidad pueden ser ignorados. (Lara, 1999).

En el agua tratada, gran parte de los sólidos son debidos a la materia orgánica característica de las aguas residuales urbanas, y son eliminados a través del metabolismo de los microorganismos residentes en el sistema, dejando un mínimo de residuos que aparecerán en el efluente. Los sólidos que no son biodegradables han sido eliminados prácticamente en su totalidad a través de los anteriores tratamientos físicos del sistema (desbaste, desarenador-desengrasador y decantador Emscher).

Para el cálculo de la eliminación de sólidos (SST), puede utilizarse la siguiente expresión empírica (Lara, 1999):

$$C_e = C_o * (0,1139 + 0,00213 * C_H)$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Donde:

C_o : Concentración de sólidos en la entrada, (74,88 mg/L).

C_e : Concentración de sólidos en el efluente, mg/L.

C_H : Carga hidráulica, m/d y cm/d.

Para poder realizar la ecuación hay que calcular la carga hidráulica del humedal, es la relación existente entre el caudal de entrada al sistema y la superficie total del mismo, por tanto la carga hidráulica será:

$$C_H = \frac{Q}{A_s}$$

Donde:

Q: Caudal entrada, (3600 m³/d).

A_s : Área (superficie) del humedal, total (13634,42 m²) , 1 humedal (3408,60 m²).

$$C_{Htotal} = \frac{3600 \frac{m^3}{d}}{13634,42 m^2} = 0,26 \frac{m}{d} = 26,40 \frac{cm}{d}$$

$$C_{Hhumedal} = \frac{3600 \frac{m^3}{d}}{3408,60 m^2} = 1,05 \frac{m}{d} = 105,61 \frac{cm}{d}$$

Por lo tanto, se puede calcular la concentración de sólidos en el efluente:

$$C_{ehumedal} = 74,88 * (0,1139 + 0,00213 * 105,61) = 25,37 \frac{mg}{L} \text{ por humedal}$$

$$C_{etotal} = 74,88 * (0,1139 + 0,00213 * 26,40) = 0,012 \frac{mg}{L} \text{ en todo el humedal}$$

Por lo que el rendimiento de eliminación de SST es:

rSST	66,11	% en 1 humedal
	99,98	% total en todo el sistema

El promedio de reducción de SST en el humedal es del 66,11 %.

N (Nitrógeno)

Complementariamente se realiza una estimación de la capacidad del sistema para eliminar nitrógeno y teniendo en cuenta que la concentración de amonio en el agua residual de pequeñas poblaciones es de aproximadamente 40-60 mg/l (Rosa Huertas I. 2013) según la Confederación Hidrográfica del Duero, de manera que se considera que el nitrógeno total del agua residual está exclusivamente en forma de amonio. La eliminación de nitrógeno puede ser complicada en un sistema de estas características, ya que puede presentarse en varias formas y requiere una serie de condiciones químicas y ambientales para su eliminación. Se produce la nitrificación de N.

La concentración de N es de 40 mg/L y los límites de vertido son 15 mg/L.

En los humedales de flujo superficial, la eliminación de nitrógeno a través de la nitrificación puede ser calculada a partir de la siguiente expresión (Lara, 1999):

$$C_e = e^{-K_t * T_{ret}} * C_o$$

Donde:

C_e : Concentración de N en el efluente, (mg/L)

C_o : Concentración de N en el afluente, (mg/L)

K_t : Constante dependiente de la temperatura, (d^{-1})

T_{ret} : Tiempo de retención hidráulico. (d)

La K_t se tiene que calcular mediante la ecuación (Lara, 1999):

$$K_t = K_{NH} * \theta_R^{T-T_r}$$

Donde:

T: Temperatura en °C, invierno y verano.

K_{NH} : constante de la reacción definido para una temperatura de referencia ($T_r=20^\circ C$).

θ_R : A la temperatura de referencia $20^\circ C$.

Invierno:

$$K_{t,Invierno} = 0,2187 * 1,048^{15-20}$$

$$K_{t,Invierno} = 0,17 d^{-1}$$

Verano:

$$K_{t,Verano} = 0,2187 * 1,048^{25-20}$$

$$K_{t,Verano} = 0,28 d^{-1}$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Ahora ya se tiene lo necesario para poder calcular la concentración del N en el efluente:

Invierno:

$$C_{e,Invierno} = e^{-0,17*4,54} * 40 = 18,22 \frac{mg\ N}{L}$$

Verano:

$$C_{e,verano} = e^{-0,28*4,54} * 40 = 11,39 \frac{mg\ N}{L}$$

Por lo que los rendimientos y el promedio serán:

Concentración en el efluente tras nitrificación		
Ce. Invierno	18,22	mg N/L
Ce. Verano	11,39	mg N/L
rN Inv.	54,44	%
rN Ver.	71,54	%
rN prom.	62,99	%

En realidad es un rendimiento bastante bajo en comparación con los resultados que se obtienen en otros ensayos, también el resultado viene determinado por la temperatura y las características climatológicas y térmicas de la zona objeto del proyecto. Normalmente los rendimientos de eliminación del N superan el 80% en los humedales, independientemente del tipo (FMF, FFSS, etc). (Fernández et al, 2015).

Con el rendimiento promedio se consigue disminuir la concentración por debajo de los límites de vertido.

P (Fosforo)

En la eliminación del fósforo total, se utiliza la siguiente ecuación tanto para humedales de flujo subsuperficial como de flujo superficial o FMF.

$$C_e = C_o * e^{\left(\frac{-K_p}{HLR}\right)}$$

Donde:

K_p : Es la constante de la reacción, (2,73 cm/d).

HLR: La tasa de carga hidráulica o carga hidráulica en todo el humedal, (26,40 cm/d).

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

$$C_e = 10 * e^{\left(\frac{2,76}{26,40}\right)} = 9,02 \frac{mg P}{L}$$

Se trata de una reducción muy pequeña, del 9,82%. Los humedales tienen unos rendimientos muy bajos de eliminación de fosforo.

Como el fosforo supera los límites de vertido hay que realizar una precipitación de este elemento para poder reducirlo más.

Balance de materia de los humedales y rendimientos:

Balances de materia en los humedales (Invierno-Verano-Promedio)							
INVIERNO							
Ud.	DQO4	DBO4	SST4	Ud.	DQO5	DBO5	SST5
mg/L	246,40	100,80	74,88	mg/L	24,64	10,08	0,0127
kg/m ³	0,25	0,10	0,07	kg/m ³	0,02	0,01	0,0000
kg/d	887,04	362,88	269,57	kg/d	88,70	36,29	0,0459
Q4 y Q5 (m ³ /h) = 150			Rendimiento (%)		90	90	99,98
VERANO							
Ud.	DQO4	DBO4	SST4	Ud.	DQO5	DBO5	SST5
mg/L	246,40	100,80	74,88	mg/L	3,99	1,63	0,0127
kg/m ³	0,25	0,10	0,07	kg/m ³	0,00	0,00	0,00001
kg/d	887,04	362,88	269,57	kg/d	14,36	5,87	0,0459
Q4 y Q5 (m ³ /h) = 150			Rendimiento (%)		98,38	98,38	99,98
PROMEDIO VERANO-INVIERNO							
Ud.	DQO4	DBO4	SST4	Ud.	DQO5	DBO5	SST5
mg/L	246,40	100,80	74,88	mg/L	14,31	5,86	25,37
kg/m ³	0,25	0,10	0,07	kg/m ³	0,01	0,01	0,03
kg/d	887,04	362,88	269,57	kg/d	51,53	21,08	91,35
Q4 y Q5 (m ³ /h) = 150			Rendimiento (%)		94,19	94,19	66,11

Densidad de plantas/m²:

La densidad de plantas por m² que tiene que haber en los humedales se encuentra entre 10 y 50 plantas/m² (Fernández et al, 2015).

NUMERO DE PLANTAS			Plantas/humedal	
Densidad (plantas/m ²)	Total	Unidades	total	Unidades
10	136344	plantas	34086	plantas/humedal
20	272688	plantas	68172	plantas/humedal
30	409033	plantas	102258	plantas/humedal
40	545377	plantas	136344	plantas/humedal
50	681721	plantas	170430	plantas/humedal

Esta densidad depende de la especie elegida, la temperatura, condiciones climáticas, etc.

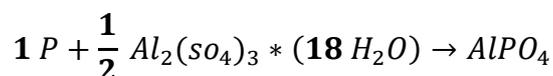
6.5. Precipitación química del fósforo

Es necesario realizar la precipitación del fósforo para que el agua en vertido no supere el límite legal en concentración de fósforo (< 2 mg P/L):

Se utilizará sulfato de aluminio (**Al₂(SO₄)₃**) para precipitar el fósforo, mediante floculación de los agregados que se formen y posterior decantación, los “fangos” resultantes con el fósforo serán retirados y tratados por el gestor encargado. El P soluble reacciona con el Al⁺³ y se forma el AlPO₄ que es insoluble, al ser insoluble precipita y se puede retirar en forma de fango que, para este caso, es una corriente con elevada concentración de sólidos, los cuales son AlPO₄.

La adición de sulfato de aluminio hidratado en el agua formará el compuesto fosfato de aluminio (AlPO₄), en esta forma más manejable es la que decantará en el tanque.

La reacción estequiométrica es:



Se tiene una concentración de entrada a la precipitación de 9,01 mg P/L ≈ **9 mg P/L** y hay que reducirla hasta 2 mg P/L.

Los pesos moleculares son (mg/mmol): Al = 27, S = 32, O = 16 y H = 1.

Fórmula	mg/mmol
Al ₂ (SO ₄) ₃	342
18H ₂ O	324
Total	666

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

$$\frac{AlPO_4}{L} = 9 \left(\frac{mg P}{L} \right) * \left(\frac{1 mmol P}{31 mg P} \right) * \left(\frac{\frac{1}{2} mmol Al_2(SO_4)_3}{1 mmol P} \right) * \left(\frac{666 mg Al_2(SO_4)_3}{mmol} \right)$$

$$= 96,7 \frac{mg Al_2(SO_4)_3}{L}$$

Reactivo en mg/L y kg/m³:

Al ₂ (SO ₄) ₃	96,68 mg /L	0,0967 kg /m ³
---	-------------	---------------------------

Se necesitan 96,7 mg Al₂(SO₄)₃/L (reactivo) = 0,0967 kg/m³ para reducir de 9 mg P/L hasta 2 mg P/L.

$$Total Al_2(SO_4)_3 \left(\frac{kg}{d} \right) = 0,0967 \frac{kg Al_2(SO_4)_3}{m^3} * 3600 \frac{m^3}{d} = 348 \frac{kg Al_2(SO_4)_3}{d}$$

Para el dimensionamiento del tanque, hay que calcular el volumen del tanque a partir de la ecuación del T_{ret}.

Para un T_{ret} teórico de 35 min (0,58 h y 0,024 d). (J. Suarez, A. Jàcome, 2007)

$$V (m^3) = 3600 \frac{m^3}{d} * 0,024 d = 87,5 m^3$$

. Variables del control de la precipitación química de fósforo

VARIABLES	VALOR
pH agua residual	6,6, - 8,5
Mezcla rápida inicial	Re > 10 ⁵
Floculación	
• Velocidad de floculación (m/s)	50 – 80
• Tiempo de floculación (min)	5 - 15
Tiempo de decantación (min)	20 – 30
Adición en decantación primaria:	
• Incremento fango primario (%)	50 – 100
• Incremento global fango 1° + 2° (%)	60 – 70
Adición en decantación secundaria:	
• Incremento fango secundario (%)	35 – 45
• Incremento global fango 1° + 2° (%)	5 - 25

Ilustración 17: Variables del control de la precipitación química del fósforo (J. Suarez, A. Jàcome, 2007)

Con un tiempo de mezcla de 10 min y un tiempo de decantación de 25 min. (T_{ret} = 10+25 = 35 min) (Tabla 17).

$$V (m^3) = \pi * r^2 * H$$

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Dimensiones tanque circular	
H	3 m
Radio	3,1 m
V	91 m³

El fango decantado se recoge y se encargará de su gestión el gestor autorizado pertinente.

Balance final del sistema:

Balance final desde la entrada el agua a tratamiento hasta que sale a vertido con sus rendimientos de eliminación (tabla 11):

Parámetro	Agua entrada (Q1)	Agua tratada (Q6)	Límites de vertido	Reducción- rendimiento
DQO (mg/L)	440	14,31	125	96,75
DBO (mg/L)	240	5,86	25	97,56
SST (mg/L)	360	25,37	60	99,996
N (mg/L)	40	14,80	15	62,99
P (mg/L)	10	9,02	2	86,67

Tabla 11: Tabla de rendimientos finales.

7. MANTENIMIENTO

Además de las anomalías que se recogen en la tabla 12 y que pueden ocurrir en el humedal, hay otra serie de acciones a tener en cuenta en el mantenimiento.

Anomalia	Causa	Solución
Deficiente calidad de los efluentes finales	Sobrecarga orgánicas Vertidos industriales a la red de alcantarillado	Ajustar la carga a la estipulada en proyecto Implantación y cumplimiento riguroso de una Ordenanza de Vertido a Colectores Municipales
Rápida colmatación de la superficie filtrante	Presencia excesiva de finos en el material filtrante Deficiente funcionamiento de las etapas de pretratamiento y/o tratamiento primario Mal funcionamiento del sistema de reparto del agua Presencia de elevadas concentraciones de sólidos en suspensión y/o aceites y grasas en las aguas a tratar.	Selección rigurosa del material filtrante Correcta explotación y mantenimiento de estas etapas Control del reparto homogéneo de la alimentación sobre toda la superficie filtrante Implantación y cumplimiento riguroso de una Ordenanza de Vertido a Colectores Municipales

Tabla 12: Principales anomalías en Humedales Artificiales, causas y soluciones. Manual depuración para poblaciones pequeñas MAPAMA

Tratamientos con agroquímicos

El único cuidado agronómico es el tratamiento de posibles plagas o enfermedades que pudieran sufrir las plantas y el segado periódico de la biomasa producida en la parte aérea de las plantas Macrófitas emergentes (2 o 3 veces en el año). (Fernández et al, 2015).

Según el Ayuntamiento de Villanubla; se requieren dos tratamientos preventivos insecticidas a razón de 15 l/ha y año, además de dos tratamientos preventivos fungicidas con 22 l/ha y año. (EDAR FMF Villanubla, 2018).

Recolección de biomasa

No existe un criterio unánime sobre la conveniencia o no de recolectar periódicamente la biomasa aérea producida. En principio la recolección aumentaría el coste de mantenimiento del sistema de depuración, a menos que el producto obtenido pueda resultar de algún valor económico. Además, la capa formada por los residuos secos correspondientes a cada año puede contribuir también al tratamiento. No obstante, el no recolectar la parte aérea puede dar lugar a que parte importante del nitrógeno y fósforo acumulados en las hojas se libere de nuevo al agua, si bien este aspecto no está bien cuantificado. Otro factor que puede hacer conveniente la recolección de biomasa es evitar que la capa de hojas muertas que se forma en el invierno haga el efecto de una pantalla que dificulte el paso de la luz a los brotes jóvenes. Si las plantas alcanzan gran desarrollo, este hecho puede retardar el crecimiento de los brotes en primavera, con resultados negativos para el sistema de depuración (I. Martín, 1989.)

Un manejo inadecuado de la biomasa cosechada puede representar un problema. La acumulación de bacterias en las raíces de las Macrófitas, puede convertir la biomasa en una fuente de contaminación, en cuyo caso se requiere un manejo cuidadoso de la cosecha (M. Sandoval et al, 2005).



Foto 6: 1^{er} Humedal EDAR Villanubla, en malas condiciones debido a un mal manejo, no se retiró la biomasa ni se hicieron trat. Fitosanitarios de control, Rodrigo de la Fuente, 2018.

¿Qué hacer con las plantas después de cosechar?

Como se ha dicho antes, el principal problema si se usa un sistema de Macrófitas flotantes es la capacidad tan limitada que tienen para acumular biomasa, por lo que hay que realizar retiros periódicos (que no cosechas) para poder permitir el crecimiento de las nuevas Macrófitas y entonces optimizar la remoción de los contaminantes. Existen bastantes alternativas sobre el qué hacer con las plantas una vez retiradas y conseguir ciertos beneficios económicos (J.Fox y R. Harvey, 1973): Usarlas como enmienda orgánica para agricultura, para producción de papel, para valorización energética como combustible o incluso como material absorbente de colorantes y metales pesados (M. Sandoval et al, 2005). Como forraje para alimentación de ganado (previa estabilización), como compost, incluso para la industria local (Fernández et al, 2015).

Lemna minor (lenteja de agua): Tiene un gran potencial para usarse para otros medios, tiene una alta digestibilidad y es una buena opción para usar en alimentación animal, una vez que ha sido estabilizada, tiene un bajo costo de retirada por ser pequeña y manejable.

Eichhornia crassipes (Jacinto de agua): El Jacinto de agua puede ser sometido a digestión anaerobia para producir metano; a compostaje para disposición posterior sobre el suelo; a secado al aire y disposición en un relleno sanitario; a incineración; o puede regarse y ararse para mejoramiento del suelo. La producción de biomasa (*Eichhornia crassipes*) puede alcanzar valores de 69,5 t/ha.año. (M. Chassany, 1985)

Typha spp. (Enea): según un estudio en la depuradora de El Escorial (Javier Fernández et al, 2015) durante 6 meses de periodo de desarrollo, desde que la Enea eran plántulas, se produjo un incremento del peso seco de ésta de 3,85 kg/m² en total. La extracción de N y P fueron de 66,01 g N/m² y 12,31 g P/m².

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

	Peso Seco (kg/m ²)	Nitrógeno (g/m ²)	Fósforo (g/m ²)
Enea			
Parte aérea	2,239	36,72	8,06
Base	0,916	17,31	2,02
Rizomas	0,320	6,91	1,28
Raíces	0,340	5,07	0,95
Total	3,815	66,01	12,31
Extracción media/día		0,75	0,14

Ilustración 18: Producción anual de biomasa y extracción de N y P. Fernández, 2015.

Por lo tanto se ve que el ciclo de uso de estas macrófitas y de otro tipo de plantas usadas en depuración no acaba en el momento en que no pueden depurar más agua, si no que todavía se pueden usar para otros medios, aumentando su aprovechamiento y haciendo que este sistema sea más sostenible aún.

8. ESTIMACIÓN DE COSTES ENTRE DIFERENTES SISTEMAS

Los costes de implantación del Filtro de Macrófitas en Flotación según el EDAR de Villanubla son:

Es equivalente al dimensionamiento que se ha hecho en este trabajo, pero como diferencia, el de Villanubla carece de desarenador, tiene una superficie con humedales casi 3 veces menor y tienen un tratamiento previo a los humedales con filtro percolador.

El coste de implantación fue de 1.152.420 € para 7000 habitantes, dimensionada para 13000 habitantes.

Coste EDAR Alameda, en Málaga: > 2.100.000 € (convencional) para 5.400 habitantes, dimensionada para 10.000.

Costes de mantenimiento:

Nº de habitantes	Filtro precolador	Mixto filtro precolador F.M.F.	F.M.F.	Fangos activos	Lagunaje
500,00	52.012,19	91.055,80	98.476,10	209.516,60	54.965,56
1.000,00	100.688,16	172.934,72	185.502,89	397.912,46	107.798,13
1.500,00	147.835,75	248.163,09	263.523,17	569.959,67	160.056,44
2.000,00	191.706,75	316.377,07	333.368,55	726.623,63	208.967,58
2.500,00	234.191,58	378.863,37	395.513,46	862.507,36	253.033,01
3.000,00	277.551,48	443.246,90	450.625,41	984.568,23	298.815,77
3.500,00	319.828,47	506.858,53	499.231,07	1.114.200,53	342.646,02
4.000,00	359.786,56	563.876,14	541.903,09	1.248.191,55	383.107,23
4.500,00	401.215,79	617.829,14	579.010,28	1.383.141,61	425.925,68
5.000,00	439.177,58	678.492,38	611.147,16	1.533.744,37	470.844,30

Tabla 13: Costes comparativos entre tratamientos. Fernández et al, 2015

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Si comparamos los diferentes sistemas de tratamientos secundarios, podemos observar que para el máximo número de habitantes (5000, cifra más cercana a los datos del proyecto) el filtro percolador es el más barato de implementar, seguido del lagunaje y en este momento estaría el humedal FMF, después, un tratamiento combinado filtro percolador con humedal FMF y finalmente estaría como alternativa más cara los fangos activos (tratamiento más convencional). Habría que fijarse además en los rendimientos de eliminación de contaminantes, su coste de mantenimiento, coste de operación y otra serie de variables. (Tabla 13).

Población (he)		100			500			1.000		
Operación	Coste horario (€/h)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)
Desplazamiento del operario										
Desplazamiento del operario	25	1 vez/semana	1	1.300,00	2 veces/semana	1	2.600,00	2 veces/semana	1	2.600,00
Pratratamiento										
Limpieza de la reja de desbaste	16	1 vez/semana	0,17	141,44	-	-	-	-	-	-
Limpieza del desarenador	16	1 vez/semana	0,20	166,40	2 veces/semana	0,35	582,40	2 veces/semana	0,50	832,00
Tratamiento primario										
Inspección, y medición espesores flotantes y fangos	16	1 vez/año	1	16,00	2 veces/año	1	32,00	2 veces/año	1	32,00
Operación	Coste (€/m³)	Frecuencia	Volumen (m³)	Coste anual (€)	Frecuencia	Volumen (m³)	Coste anual (€)	Frecuencia	Volumen (m³)	Coste anual (€)
Extracción y gestión de fangos y flotantes	15	1 vez/año	20	300,00	2 veces/año	35	1.050,00	2 veces/año	70	2.100,00
Humedales Artificiales										
Operación	Coste horario (€/h)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)
Inspección general: comprobación dispositivo alternancia alimentación y de su reparto uniforme	16	1 vez/semana	0,17	141,44	2 veces/semana	0,25	416,00	2 veces/semana	0,33	549,12
Limpieza tuberías distribución	16	1 vez/mes	0,5	96,00	1 vez/mes	0,5	96,00	1 vez/mes	0,5	96,00
Siega de las plantas	16	1 vez/año	24	384,00	1 vez/año	120	1.920,00	1 vez/año	240	3.840,00
Control permeabilidad del sustrato	16	1 vez/año	4	64,00	1 vez/año	8	128,00	1 vez/año	12	192,00
Operación	Coste (€/m³)	Frecuencia	Volumen (m³)	Coste anual (€)	Frecuencia	Volumen (m³)	Coste anual (€)	Frecuencia	Volumen (m³)	Coste anual (€)
Evacuación residuos poda	5	1 vez/año	52	260,00	1 vez/año	262	1.310,00	1 vez/año	525	2.625,00
Operación	Coste horario (€/kWh)		Consumo (kWh/a)	Coste anual (€)		Consumo (kWh/a)	Coste anual (€)		Consumo (kWh/a)	Coste anual (€)
Consumo energético										
Desbaste automático	0,09	-	-	-	-	750	67,50	-	1.500	135,00
Mantenimiento										
Operación	Coste horario (€/h)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)	Frecuencia	Tiempo (h)	Coste anual (€)
Mantenimiento obra civil	16	24 veces/año	2	768,00	24 veces/año	7	2.304,00	24 veces/año	11	4.224,00
Seguimiento										
Operación	Coste (€/a)	Frecuencia		Coste anual (€)	Frecuencia		Coste anual (€)	Frecuencia		Coste anual (€)
Control analítico	300	4 veces/año		1.200,00	4 veces/año		1.200,00	4 veces/año		1.200,00
Coste total explotación y mantenimiento (€/año)				4.781,75			11.602,60			18.121,57
Coste total unitario (€/h-e.año)				47,82			23,21			18,12

Tabla 14: Costes de explotación y mantenimiento en HAFH, según Manual MAPAMA.

En la tabla 14, se observan las operaciones básicas de mantenimiento del humedal y su coste aproximado, los costes van aumentando a medida que aumenta la superficie de diseño (en base a la cantidad de población).

Se tienen una serie de costes fijos como son los sueldos de los operarios, el consumo energético, los controles analíticos trimestrales, etc. Operaciones básicas como gestión de fangos, la siega de plantas y el mantenimiento de obra civil. Estas operaciones y sus costes varían en función de la automatización del EDAR, del tamaño y la localización del mismo.

Depuración de agua residual urbana con filtro de macrófitas en flotación

Mientras que el coste total de explotación y mantenimiento (€/año) aumenta cada vez que aumenta la población, el coste total unitario (€/h.e año) disminuye con un mayor número de población.

Los costes de mantenimiento y explotación según el EDAR de Villanubla son:

Mantenimiento obra civil: 0,2 % del presupuesto total (1.152.420 €)= 2305 €.

Instalaciones electromecánicas: 0,8% del presupuesto (1.152.420 €) = 3952 €.

Personal = 1000 €/año.

Energía eléctrica = 17.941 €/año (bombas, cintas, filtros y desbaste)

Transportes a vertedero = 2.164 €/año.

Productos fitosanitarios = 1671 €/año.

Total = 29.033 €/año.

9. CONCLUSIONES

Se consiguen unos resultados muy positivos, ya que con todos los tratamientos y con los humedales artificiales se consigue reducir todas las variables del agua residual y así conseguir que el vertido al río sea por debajo de los límites permitidos por la confederación y por el MAPAMA, el principal inconveniente radica en la enorme superficie que necesitaría el dimensionamiento de los cuatro humedales artificiales de FMF para los 13934 habitantes equivalente, esto es debido a que estos sistemas están preparados para zonas donde haya una población menor de 5000 habitantes, ya que a partir de ahí, la curva de coste de implantación deja de ser rentable por la enorme cantidad de terreno y la capacidad para la que han sido diseñados dichos sistemas. Los estudios sobre los que se ha basado este trabajo contemplaban unos caudales medios de menos de 300 m³/d, en este caso se multiplicaba por 10 el caudal.

Se pueden considerar estos sistemas extensivos como tratamiento principal para zonas de aproximadamente 2000 habitantes, pero cuando esta cifra se supera, no se puede considerar como tratamiento principal secundario, en estos casos se tiene que tomar como un tratamiento secundario o terciario de afino, siempre con otra serie de tratamientos previos combinados con los humedales, en el caso del EDAR Villanubla, tienen un tanque filtro percolador con el que consiguen una reducción importante en DBO₅ antes de los humedales, además de ser un tratamiento combinado muy eficiente (Tabla 13).

Otras opciones hubieran sido:

- Variar la profundidad del humedal, con lo que se consigue una disminución de la superficie total, pero aumenta la carga orgánica y se pueden dar condiciones anaerobias si se profundiza mucho (hasta 5 metros).
- Variar el caudal medio de entrada a los humedales con un tanque intermedio.

Otro dato a tener en cuenta es la baja capacidad que tiene el humedal para la remoción de fósforo, que, dependiendo de las características del agua a tratar, puede ser un problema y necesitar un tratamiento extra (como ocurre en este trabajo al usar datos teóricos de entrada de fósforo según la Confederación Hidrográfica del Duero).

En conclusión, es una buena alternativa para depurar aguas residuales para pequeñas poblaciones, como tratamiento secundario y como tratamiento combinado en poblaciones más grandes, ya que se trata de una alternativa más sostenible y económica que un EDAR tradicional.

10.MARCO LEGAL

Normativa general de aguas y planificación hidrológica.

- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Modificada por la Decisión 2455/2001/CE.
- Texto Refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.
- Reglamento del Dominio Público Hidráulico que desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto 849/1986.
- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.
- Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica
- Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica.

Normativa específica sobre tratamiento de aguas residuales y depuración

- Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de aguas residuales urbanas.

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

Tabla 15: Tratamientos exigidos por la Directiva 91/271/CEE en función de la población y zona de vertido.

T.A.: Tratamiento adecuado: el tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante cualquier proceso y/o sistema de eliminación en virtud del cual, después del vertido de dichas aguas, las aguas receptoras cumplan los objetivos de calidad y las disposiciones pertinentes de la presente y de las restantes Directivas comunitarias. (Tabla 14).

T.1º: Tratamiento primario: el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico y/o químico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO5 de las aguas residuales que entren se reduzca por lo menos

en un 20% antes del vertido y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca por lo menos en un 50%. (Tabla 14).

T.2º: Tratamiento secundario: el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya, por lo general, un tratamiento biológico con sedimentación secundaria, u otro proceso en el que se respeten los requisitos del cuadro 1 del Anexo I.: reducción DBO₅ > 70-90% o < 25 mg/l; reducción DQO > 75% o < 125 mg/l; reducción sólidos en suspensión > 90% o < 35 mg/l. (Tabla 14).

T.M.R: Tratamiento más riguroso que el secundario: tratamiento mediante el cual, según la situación local, se reduzca el nitrógeno total, el fósforo total o ambos parámetros, de acuerdo a los siguientes requisitos: para 10.000 < Población < 100.000 h-e, reducción Nt > 70-80% ó < 15 mg/l, reducción Pt > 80% ó < 2 mg/l.; para Población > 100.000 h-e, reducción Nt > 70-80% ó < 10 mg/l, reducción Pt > 80% ó < 1 mg/l. (Tabla 14).

- Directiva 98/15/CE de la Comisión, de 27 de febrero de 1998, por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo en relación con determinados requisitos establecidos en su anexo I.
- Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, de trasposición de la Directiva 91/271/CEE, por el que se establecen normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas.
- Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-Ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen normas aplicables al tratamiento de aguas residuales urbanas. Modificado por Real Decreto 2116/1998.
- Resolución de 30 de junio de 2011 de la Secretaría de Estado de Medio Rural y Agua, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias.

11. DIAGRAMA DE PROCESOS

12. BIBLIOGRAFÍA

JESÚS FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, EDUARDO DE MIGUEL BEASCOECHEA, JOSÉ DE MIGUEL MUÑOZ, M^a DOLORES CURT FERNÁNDEZ DE LA MORA (2015). *Manual de Fitodepuración. Filtro de Macrófitas en flotación*. Proyecto Life, Nuevos filtros verdes de macrófitas en flotación para la Cuenca Mediterránea. EDITAN.

METCALF & EDDY (2002). *Wastewater Engineering. Treatment and reuse*. McGraw Hill 4^a Ed. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill. ISB: 84-481-1607-0.

CARLOS MARCOS PRIMO y ROSA HUERTAS. *Actuaciones de la Confederación Hidrográficas del Duero para el tratamiento de vertidos en pequeñas poblaciones*. Comisaría de Aguas de la CHD.

JORGE MARTELO, JAIME A. LARA BORRERO (2012). *Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte*.

RODRÍGUEZ PÉREZ DE AGREDA CELIA, DÍAZ MARRERO MIGUEL, GUERRA DÍAZ LUIS, HERNÁNDEZ DE ARMAS, JULIA MARÍA. *Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales*. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" (ISPJAE). Facultad de Ingeniería Química. Ciudad de La Habana, Cuba.

OSCAR DELGADILLO, ALAN CAMACHO, LUIS F.PÉREZ, MAURICIO ANDRADE (2012). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA) Universidad Mayor de San Simón.

J. FERNÁNDEZ (2001). *Filtro autoflotante de Macrófitas para la depuración de aguas residuales*. pages 171–180.

LARA-BORRERO, J. (1999), *Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales* [tesis de maestría], Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, Máster en ingeniería y gestión ambiental.

TANNER, C.; KADLEC, R. (2003). *Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands*. *Water Science and Technology* 48 (5), pp. 191-198.

SOLER C., CRESPI R., SOLER E., PUGLIESE M. 2018. *Performance of free water surface flow constructed wetland with floating aquatic macrophytes*. *Ingeniería del agua*, 22(2), 69-78. <https://doi.org/10.4995/la.2018.8596>.

J. SUÁREZ, A. JÁCOME (2007). *Sistemas de saneamiento*, Master de ingeniería ambiental. Universidad da Coruña.

SALAS J.J.; PIDRE J.R.; MARTÍN I. (2007). *Manual de Tecnologías No Convencionales para la Depuración de Aguas Residuales*. Capítulo II: Aplicación al Terreno, ISBN 13: 978-84-611-6883-5.

SALAS, J.J. (2008). *Tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante Filtros de Turba: modificaciones en el diseño y empleos alternativos*. Tesis Universidad de Sevilla. Facultad de Química. Departamento de Química analítica. Pendiente de publicación

SAURA MARTIN MARTINEZ *Depuración de aguas con plantas emergentes*, Doctora Ingeniero Agrónomo, Unidad de Botánica Agrícola E. T. S. I. A. Ciudad Universitaria. 28040 Madrid

- RAVEN, P., R. EVERT and S. EICHHORN. 1971. *Biology of plants*. 5 ed. New York: Worth. 791p.
- MARÍA DEL PILAR ARROYAVE. 2002. *La lenteja de agua (Lemna minor) una planta acuática promisoría*. Rev. EIA. Esc. Ing. Antioq no.1 Envigado Jan./June 2004.
- SANZ ELORZA M., DANA SÁNCHEZ E.D. & SOBRINO VESPERINAS E., eds. 2004. *Atlas de las plantas alóctonas invasoras en España*. Dirección General para la Biodiversidad. Madrid, 384 pp.
- GONÇALVES ML (1978) *Flora Zambesiaca*, 4. Royal Botanic Gardens, Kew (GB).
- JORGE MARTELO, JAIME A. LARA BORRERO. 2012. *Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales; una revisión del estado del arte*. Ingeniería y Ciencia, ing. cienc. ISSN 1794–9165
- TELLO ZEVALLOS, W. ET AL. *Evaluación de macrófitas autóctonas de flotación libre para su empleo en el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados* [en línea]. *Energeia*, 14(14), 2016.
- VYMAZAL, J. (2008). *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*. Springer Science+ Business Media B.V. ISBN: 978-1-4020-8234-4.
- KADLEC, R.; WALLACE, S. (2009). *Treatment Wetlands*. Second Edition. CRC Press. Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-56670-526-4.
- CRITES, R.; TCHOBANOGLIOUS, G. (2006). *Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados*. McGraw Hill.
- BRIX, H. (2004). *Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage*. Vol. 1. pp.1-9. 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Avignon (France).
- MARTÍN, I. (1989). *Depuración de aguas con plantas emergentes*. Ed. Servicio de Extensión Agraria, D.L. ISBN: 84-341-0659.
- G. HENRY-SILVA, A. CAMARGO, AND M. PEZZATO (2008). *Growth of free-floating aquatic macrophytes in different concentrations of nutrients*. *Hydrobiologia*, 610(1):153– 160, June 2008..
- S. PETERSON AND J. TEAL. *The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems*. *Ecological Engineering*, 6(1-3):137–148, 1996.
- A. NAHLIK AND W. MITSCH. *Tropical treatment wetlands dominated by freefloating macrophytes for water quality improvement in Costa Rica*. *Ecological Engineering*, 28(3):246–257, 2006.
- EPA. *Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment* | US EPA.
- CONDORI L. DELGADILLO M. *Planta de tratamiento de aguas residuales con Macrófitas para comunidades cercanas al lago titicaca*. *Journal Boliviano de Ciencias*, 7(21):63–66, 2010.
- SANDRA SOTO BAYÓ. MAPAMA, (2007). *Listado de especies exóticas invasoras de la península ibérica*. Accion especial REN2002-10059-E.
- PETER H. RAVEN, BRENT BERLIN, DENNIS E (2009) *The Origins of Taxonomy* Author(s):. Breedlove Source: *Science*, New Series, Vol. 174, No. 4015 (Dec. 17, 1971), pp. 1210-1213 Published by: American Association for the Advancement of Science.
- ARMSTRONG, W. 2003. *Wayne's Word Lemnaceae On –Line*. INSTITUTO GALLACH. 1984. Historia natural. Volumen V. Barcelona: Océano.

SANZ ELORZA M., DANA SÁNCHEZ E.D. & SOBRINO VESPERINAS E., eds. 2004. *Atlas de las Plantas Alóctonas Invasoras en España*. Dirección General para la Biodiversidad. Madrid, 384 pp.

HERNÁNDEZ MUÑOZ, A.; HERNÁNDEZ LEHEMAN, A.; GALÁN MARTÍNEZ, P. (1995). *Manual de depuración de URALITA*. Sistemas para la depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes. Editorial Paraninfo.

ENRIQUE ORTEGA DE MIGUEL, YASMINA FERRER MEDINA, JUAN JOSÉ SALAS RODRÍGUEZ, CASRLOS ARAGÓN CRUZ, ÁLVARO REAL JÍMENEZ. CENTA. *Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. 2010.

E. Â-BEK AND H. HASAR. *Role of duckweed (Lemna minor L.) harvesting in biological phosphate removal from secondary treatment effluents*. Fresenius Environmental Bulletin, 11(1):27–29, 2002.

TANNER, CHRIS & SUKIAS, JAMES & PARK, JASON & YATES, CHARLOTTE & HEADLEY, TOM. (2018). *floating treatment wetlands: a new tool for nutrient management in lakes and waterways*.

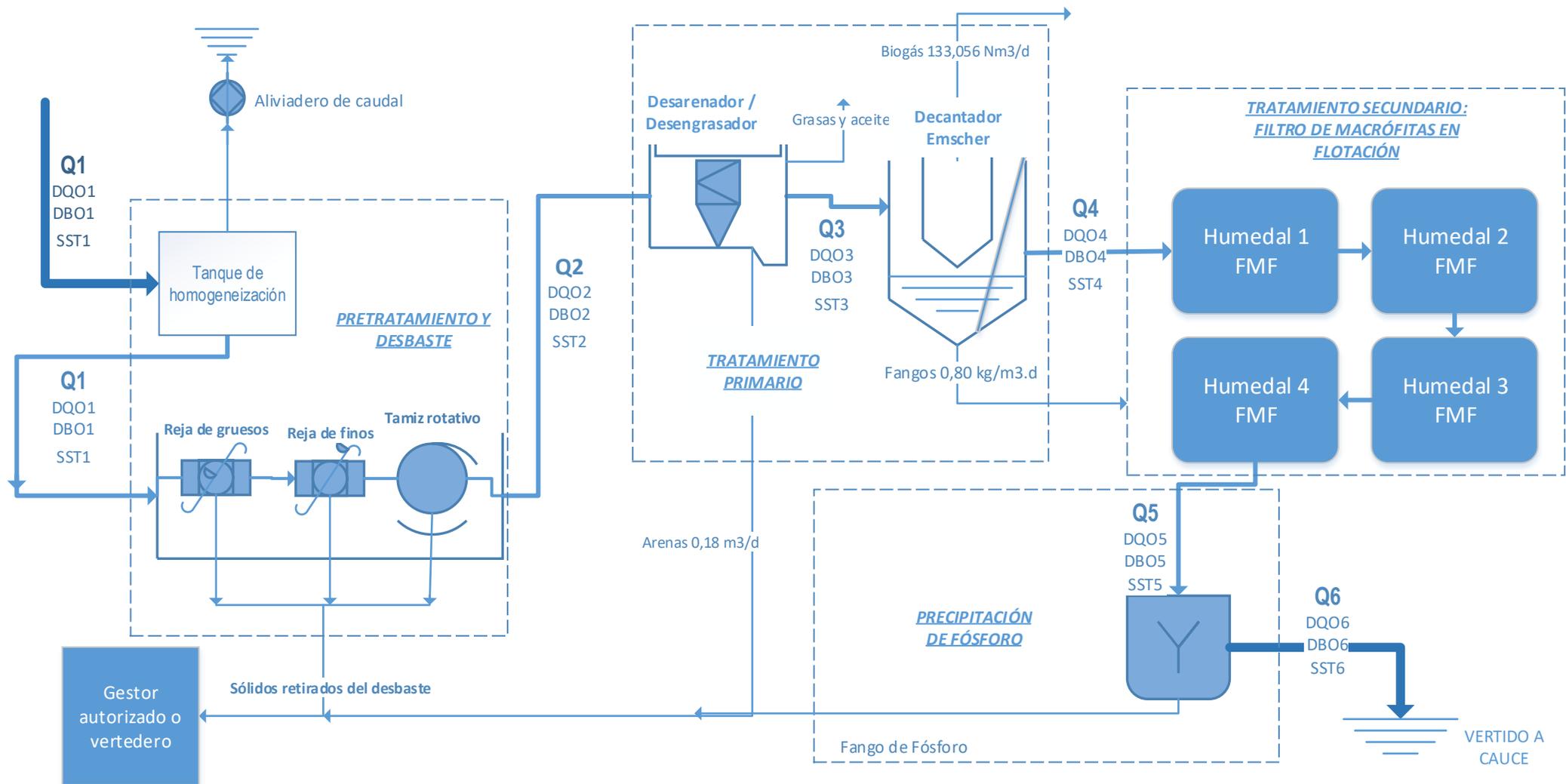
HERNÁNDEZ, A. HERNÁNDEZ, P. GALÁN, CIDTA USAL. Desarenado – Desengrasado.

SANDOVAL M. CELIS J., JUNOD J. *Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. Theoria, 14:17–25, 2005.

FOX J. HARVEY R. *Nutrient removal using lemna minor*. *Water Pollution Control Federation*, 45(9):1928–1938, 1973. ArticleType: research-article / Issue Title: Annual Conference Issue / Full publication date: Sep., 1973 / Copyright 1973 Water Environment Federation.

M. CHASSANY. *Eichhornia crassipes: production in repeated harvest systems on waste water in the languedoc region (France)*. Biomass, 7(2):135–160, 1985.

Diagrama de procesos de EDAR con Filtro de Macrófitas en Flotación



Ud.	DQO1	DBO1	SST1	DQO2	DBO2	SST2	DQO3	DBO3	SST3	DQO4	DBO4	SST4	DQO5	DBO5	SST5	DQO6	DBO6	SST6
mg/L	440	240	360	440	180	234	352	144	187,2	246,4	100,8	74,88	14,31	5,86	25,37	14,31	5,86	25,37
kg/m3	0,44	0,24	0,36	0,44	0,18	0,234	0,352	0,144	0,1872	0,2464	0,1008	0,07488	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03
kd/d	1584	864	1254,06	1188	648	940,545	950,4	518,4	752,436	887,04	362,88	269,568	51,53	21,08	91,35	51,53	21,08	91,35
	Q1 (m3/h) = 150			Q2 (m3/h) = 150			Q3 (m3/h) = 150			Q4 (m3/h) = 150			Q5 (m3/h) = 150			Q6 (m3/h) = 150		