



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

MÁSTER OFICIAL EN  
INGENIERÍA AMBIENTAL

Aplicación de Tecnologías Blandas a la  
Depuración de Aguas Residuales.

Dimensionamiento para la Población de Huerta  
(Salamanca).

Autor:

VICENTE NUEVO, CARLOS

Tutor Académico:

PEÑA MIRANDA, MARÍA DEL MAR

AGRIPINA

Departamento de Ingeniería  
Química y Tecnología del Medio  
Ambiente

Valladolid, 19 de Julio de 2017



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**



## Tabla de contenido

<b>1. RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
<b>4. TIPOS DE TECNOLOGÍAS BLANDAS</b> .....	<b>13</b>
<b>4.1. EN TERRENO</b> .....	<b>13</b>
4.1.1. FILTRO VERDE .....	13
4.1.2. INFILTRACIÓN .....	16
4.1.3. ESCORRENTIA .....	17
4.1.4. LECHO TURBA .....	18
4.1.5. LECHO ARENA .....	19
<b>4.2. ACUÁTICOS</b> .....	<b>20</b>
4.2.1. LAGUNAJE .....	20
4.2.2. HUMEDAL .....	23
1.1.1. Mecanismos de eliminación .....	31
1.1.2. Rendimiento .....	35
1.1.3. CULTIVO ACUÁTICO O MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN .....	39
<b>5. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS NATURALES DE DEPURACIÓN DE A.R. Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS</b> .....	<b>41</b>
<b>6. CONTAMINANTES EMERGENTES Y SU ELIMINACIÓN A TRAVÉS DE HUMEDALES</b> .....	<b>45</b>
<b>6.1. EFECTOS SOBRE LOS SERES VIVOS</b> .....	<b>45</b>
<b>6.2. CONTAMINANTES EMERGENTES MÁS COMUNES</b> .....	<b>46</b>
6.2.1. Retardantes de llama bromados .....	46
6.2.2. Parafinas cloradas .....	46
6.2.3. Plaguicidas polares y metabolitos .....	47
6.2.4. Compuestos perfluorados .....	47
6.2.5. Fármacos y productos de higiene personal .....	48
6.2.6. Drogas .....	49
<b>6.3. ELIMINACIÓN A TRAVÉS DE HUMEDALES</b> .....	<b>49</b>
<b>7. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA</b> .....	<b>53</b>
<b>7.1. DESBASTE</b> .....	<b>54</b>
<b>7.2. TANQUE IMHOFF</b> .....	<b>60</b>
<b>7.3. HUMEDALES</b> .....	<b>65</b>
7.3.1. Previa construcción .....	65
7.3.2. Impermeabilización .....	65
7.3.3. Vegetación .....	66
7.3.4. Microorganismos .....	71
7.3.5. Animales .....	71
7.3.6. Bases de diseño .....	72
7.3.7. Esquema del proceso .....	76
7.3.8. Resultado del Humedal .....	78
<b>7.4. FILTROS VERDES</b> .....	<b>79</b>



7.4.1.	Esquema del proceso .....	80
7.4.2.	Diseño y cálculo de parámetros .....	81
7.4.3.	Resultados del Filtro Verde .....	87
<b>8.</b>	<b>COMPARATIVA DEL ESTUDIO .....</b>	<b>89</b>
<b>9.</b>	<b>HUMEDAL EN HUERTA (SALAMANCA) .....</b>	<b>91</b>
9.1.	DIMENSIONES LUGAR .....	91
9.2.	COMO SE LLEVARÁ AL LUGAR .....	93
9.3.	ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA .....	94
9.4.	ESQUEMA DEL TRATAMIENTO .....	94
9.5.	RESULTADOS DE DISEÑO .....	95
9.5.1.	Desbaste .....	95
9.5.2.	Tanque Imhoff .....	96
9.5.3.	Humedal .....	97
<b>10.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>99</b>
<b>11.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>103</b>



## 1. RESUMEN

Se ha realizado el diseño de una planta para el tratamiento de las aguas residuales de una pequeña población, mediante tecnologías blandas. Para ello, se han dimensionado y comparado dos tecnologías blandas, como son los humedales y los filtros verdes.

Tras el dimensionamiento y comparación, se ha visto que, en cuanto a ahorro económico, rendimiento y aprovechamiento, el humedal es el más adecuado para la implantación.

El humedal está diseñado para tratar el caudal de agua de una población de 1500 personas, recogándose el agua de varios pueblos contiguos a él, correspondiente a una extensión de 2 hectáreas. Para su dimensionamiento, se han tomado las condiciones de temperatura más desfavorables para la zona, tomándose 10 °C como valor referencia.

El esquema que seguirá la planta EDAR para pequeñas poblaciones, será un pretratamiento consistente en tanque de homogeneización, un desbaste y un tanque Imhoff, seguido de un humedal FHS.

### Palabras Clave

Tecnologías blandas, pequeñas poblaciones, filtro verde, humedal.



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

## 2. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías blandas, son los procedimientos o técnicas en los que la eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales, se realiza de forma natural, sin el empleo de ningún aditivo químico. Se tendrán dos tipos de tecnologías blandas. Por un lado, los tratamientos de aplicación de agua residual sobre un terreno y, por otro lado, las acuáticas.

Estos sistemas forman un ecosistema en los que juegan un papel fundamental los microorganismos y las plantas, cuya acción biológica y eficiente simbiosis, permiten eliminar cantidades excesivas de contaminantes, M.O., metales pesados y patógenos (Tabla 1).

<b>EFEECTO POTENCIAL CONTAMINANTE</b>	<b>EN LA SALUD</b>	<b>EN EL MEDIOAMBIENTE</b>	<b>ELIMINACION CON TECNOLOGÍAS BLANDAS</b>
<b>NITRÓGENO</b>	Suministro de agua a niños pequeños provocando dolor y asfixia	eutrofización	Procesos de nitrificación/desnitrificación y pérdida de gas a la atmosfera
<b>FÓSFORO</b>	No tiene impacto directo	Eutrofización	Captación por las plantas y retención en el terreno
<b>PATÓGENOS</b>	Formación de aerosoles en el suministro de agua para cultivos acumulándose en riñones, hígado, pulmones y sistema nervioso	Acumulación en el terreno y contaminación de la vida salvaje	No es una gran preocupación
<b>METALES PESADOS</b>	Suministro de agua a cultivos y animales en la cadena alimentaria humana	A largo plazo daños en el terreno y es toxico para plantas y animales	A través de precipitaciones y metabolismo de las plantas
<b>TRAZAS ORGÁNICAS</b>	Suministro de agua para plantas y animales en la cadena alimentaria	Acumulación en el terreno	Absorción a través de materia orgánica y partículas de arcilla.

Tabla 1: Contaminantes, efectos potenciales y eliminación de forma natural



En todos ellos, se dan procesos químicos, como reacciones redox, físicos, como la decantación y biológicos, como la actuación de las plantas y microorganismos, contribuyendo todos ellos a la depuración de las aguas.

En las tecnologías sobre terreno se tendrán: filtros verdes, infiltración, escorrentía, lecho de turba y lecho de arena. En cuanto a las acuáticas se encontrarán: lagunaje, humedal y macrófitas en flotación.

Su efecto depurador es debido a la acción combinada de suelo, microorganismos y vegetación.

Estas tecnologías se caracterizan principalmente por la escasa producción de fangos, y mínima necesidad de energía y de personal de mantenimiento. Su principal inconveniente respecto de las tecnologías convencionales, son la gran cantidad de superficie que se necesita para su ubicación, escasa eficacia en poblaciones elevadas y que su éxito radica en contaminantes biodegradables.

En la tabla siguiente, se compara las tecnologías convencionales respecto de las tecnologías naturales (Tabla 2). Las principales ventajas de las convencionales son la menor necesidad de terreno y menores tiempos de tratamiento. Las de las naturales, son la escasa generación de fangos y el mínimo gasto energético.



Duras/Intensivas/Convencionales	Blandas/Extensivas/Naturales
Gasto energético elevado: Energía eléctrica para la oxigenación y mezcla en reactores (costes elevados)	Mínimo o nulo gasto energético: Energía natural (sol y ocasionalmente viento)
Cemento, equipos de tecnología dura y avanzada	Poco cemento y pocos o ningún equipo de tecnología avanzada. Los movimientos de tierras en la construcción son importantes
Proporcionalmente poca superficie	Requieren mucha superficie
Mantenimiento y explotación complicado Mano de obra muy especializada	Mantenimiento y explotación simple El gestor debe conocer los procesos y ser capaz de prevenir problemas Los operadores habituales no suelen aceptar la tecnología
Se puede influir rápidamente en los procesos	Los mecanismos de tratamiento tienen mucha inercia, suele ser difícil actuar con rapidez
Tiempo de residencia hidráulico corto	Tiempo de residencia hidráulico prolongado o muy prolongado
Aspecto tecnológico y artificial	Buena integración en el paisaje. Suele aparecer fauna salvaje
Procesos artificializados (sistemas muy acelerados)	Procesos naturales a velocidad "natural", ligeramente aumentada debido a la homogeneidad del medio
Adaptabilidad reducida a cambios de caudal o carga	Usualmente buena adaptabilidad a cambios de caudal y/o carga
Generación de lodos elevada	Generación de lodos reducida o nula

Tabla 2: Comparación de Tecnologías Intensivas y Extensivas. Fuente: LIFE 11, 2012

En España, su fracaso fue debido a su deficiente construcción y acondicionamiento para poblaciones y cargas superiores a las que podía operar, llegando incluso a utilizarse para efluentes industriales. (Medina Y.F., Ortega E., Salas. J.J, 2012). Más adelante se mostrará un mapa donde se encuentran los humedales artificiales en España. (Ilustración 7).



En la tabla siguiente se muestran las ventajas e inconvenientes que tienen este tipo de tecnologías naturales. (Tabla 3).

Ventajas	Inconvenientes y/o limitaciones
Integración en el paisaje/medio Valores paisajísticos	Necesidades de superficie elevadas
Adaptabilidad a variaciones de carga hidráulica	Determinadas tecnologías generan efluentes finales con sólidos en suspensión (algas, restos vegetales)
Facilidad de explotación respecto a los sistemas convencionales	Alta evaporación/evapotranspiración y posible aumento de la salinidad del efluente final
Bajo coste de explotación	Sensibilidad a bajas temperaturas y radiación solar
Elevada capacidad de eliminación de microorganismos	Sensibilidad diversa a influentes concentrados y/o sépticos
Buen rendimiento en la eliminación de nutrientes	No son sistemas adecuados para efluentes industriales de muy alta carga
Existe la posibilidad de reutilizar el efluente y la biomasa producida	Riesgo de olores en caso de mal funcionamiento
Buena mineralización de los fangos	Riesgo de aparición de mosquitos en caso de mal mantenimiento
No requieren una fuente de energía externa	Es conveniente disponer de terrenos fácilmente impermeabilizables y con poca pendiente
Requiere poca mano de obra y no excesivamente especializada	Pocas posibilidades de intervención rápida en el proceso

Tabla 3: Ventajas e Inconvenientes de las Tecnologías Blandas. Fuente: LIFE 11, 2012



### 3. OBJETIVOS

El trabajo se centrará en la eliminación de contaminantes contenidos en aguas residuales a través de filtros verdes y de humedales.

Tras comparar ambas tecnologías, se elegirá la más adecuada y se dimensionará para una población total de 1500 habitantes, correspondiente a varios municipios de la provincia de Salamanca.

El principal objetivo es dimensionar una planta de tratamiento de aguas residuales para pequeñas poblaciones, mediante tecnologías blandas, de manera más económica y natural.

No puede aplicarse en aguas industriales debido a las altas cargas residuales que contienen.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## 4. TIPOS DE TECNOLOGÍAS BLANDAS

Existen dos tipos de tecnologías blandas. Las tecnologías blandas en terreno, y las acuáticas.

En terreno se tienen: Filtro verde, infiltración, escorrentía, lecho de turba y lecho de arena. Y en acuáticos: lagunaje, humedal y cultivo acuático o macrófitas en flotación.

Todas estas tecnologías necesitarán, previo almacenaje del agua en tanque de homogeneización, como mínimo, un pretratamiento previo de desbaste, donde se eliminarán sólidos gruesos y finos, y un tanque Imhoff.

### 4.1. EN TERRENO

La depuración es realizada a través del sistema planta-suelo-agua, donde hay procesos naturales físicos, químicos y biológicos. En él, se cumplen dos funciones, por un lado, es el medio receptor de la contaminación, evitándose que sea vertido en otro medio y, por otro lado, es un agente activo de depuración, eliminándose, tanto en su interior como en el exterior, nutrientes, materia orgánica y microorganismos.

#### 4.1.1. FILTRO VERDE

Consiste en la instalación sobre la superficie de terreno de una masa forestal o cultivo sobre la que se aplicará un caudal controlado de agua residual.

La depuración se realiza por procesos entre las plantas, los microorganismos y el suelo, y tiene lugar en los horizontes superiores. Ocurren procesos físicos, como la filtración, químicos, como la precipitación o intercambio iónico, o biológicos, como la degradación de la materia orgánica que se encuentre en el agua.

La cubierta vegetal que se utilice dependerá del suelo que vayamos a tratar y del grado de tratamiento que queramos tener.

Para la instalación del filtro verde, se necesitará tener una serie de condiciones con el terreno y el agua residual (Metclaf y Heddy, 2002 y tabla 4):

- Terrenos con granulometrías y permeabilidades características, como pueden ser su buen drenaje y aireación. Los más favorables serán los terrenos franco-arcillosos y los franco-arenosos.
- Nivel piezométrico a más de 1,5 m, incluso el doble o triple. Necesario para evitar la contaminación de acuíferos.
- Superficie necesaria de 40 m<sup>2</sup>/ hab, variando esta de 10-90 m<sup>2</sup>/hab, es decir, 1 ha por 250 habitantes. Todo ello depende de las características climáticas e hidrológicas de la zona en la que lo queramos poner.
- El agua residual no debe contener sustancias que resulten nocivas para los cultivos
- Aplicación de un ciclo intermitente de 4-10 días de agua residual, con lo que mantendremos un terreno con predominación de condiciones aerobias
- Las cargas hidráulicas aplicadas sobre la superficie activa varían entre 0,5-6 m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup> año. Todo ello dependerá de la naturaleza del terreno, época del año y tipo de cultivo.

Característica	Aptitud		
	Óptima	Conveniente	Pobre
<b>Suelo:</b>			
- pH	5,5-8,4	5,2-5,5	<5,2; >8,4
- Porcentaje de Intercambio de Sodio (%)	<5	5-10	>10
- Conductividad eléctrica (mmhos/cm)	<4	4-8	>8
- Permeabilidad (mm/h)	5-50	1,5-5; 50-150	<1,5; >150
- Profundidad del nivel freático (m)	>1,5	0,6-1,5	< 0,6
Pendiente (%)	0-2	2-15	>15
Uso del terreno	Agrícola	Baja intensidad	Urbano/industrial
Hidrología	Sin riesgo de inundación	Bajo riesgo de inundación	Elevado riesgo de inundación

Tabla 4: Características del emplazamiento y criterios de selección para los F.V. (Metcalf & Eddy, 2002)

Los rendimientos que se obtienen serán de una reducción de un 90% de la DBO<sub>5</sub>, del 95% de los SST y del 80% de los patógenos, fósforo y compuestos nitrogenados.

Las ventajas encontradas en este sistema son la depuración de aguas, crecimiento de especies vegetales maderables, recarga de acuíferos y, la más importante, ausencia de generación de fangos.

Las desventajas son, principalmente, las altas superficies necesarias y las bajas cargas con las que opera, lo que hace que sólo se puedan instalar para poblaciones inferiores a 10.000 habitantes. Otro inconveniente es que, en climas fríos, se produce una parada vegetativa de los cultivos implantados en el sistema, con el consecuente descenso del rendimiento. Se produce un descenso de la evapotranspiración, que unida a la parada vegetativa, puede producir una contaminación de los acuíferos si el filtro no ha sido bien sobredimensionado, o si el nivel piezométrico es inferior a los 1,5m. (Tabla 5).

Ventajas	Inconvenientes y/o limitaciones
Integración paisajística excelente Revalorización del terreno Puede contribuir a la recarga de acuíferos	La extensión requerida es muy grande > 20 m <sup>2</sup> /hab.eq
Tratamiento, reutilización y eliminación simultáneos Tratamiento muy adecuado si el medio receptor es sensible o ausente	Es uno de los sistemas menos adecuado para aguas residuales con cargas orgánicas elevadas
Consumo energético nulo o reducido	Fuertes restricciones que impone el terreno (con determinada capacidad de filtración y que no presenten acuíferos someros)
Facilidad de explotación y mantenimiento sencillo	Dificultad de medir correctamente los rendimientos de depuración
Proceso adaptado a aumentos de caudal por población estival Rendimientos de depuración muy elevados	Mantenimiento especializado (jardinería) que no suelen asumir los explotadores
Se puede aprovechar económicamente la vegetación generada Actúan como sumideros de CO <sub>2</sub>	

Tabla 5: Ventajas e Inconvenientes de los Filtros Verdes. Fuente: LIFE 11, 2012



El filtro verde es uno de los que mayor potencial de tratamiento de aguas residuales tiene, debido a las bajas cargas con las que se trata y al sistema activo cercano a la superficie que en él se encuentra. Para su implantación se necesitará un tratamiento previo, consistente en un tanque de homogeneización, un desbaste y un tanque Imhoff.

En la actualidad, tras la aprobación del Real Decreto 1620/ 2007 de Reutilización de Aguas Depuradas, se ha llegado a la conclusión de que la utilización única de los filtros verdes como descontaminantes, no puede aplicarse a aguas residuales brutas debido a las altas cargas contaminantes que tienen, sino a los usos establecidos en el Real Decreto. En él se exige algún tipo de tratamiento previo a las aguas que van a ser vertidas.

#### 4.1.2. INFILTRACIÓN

La infiltración es la aplicación controlada de altas tasas de agua residual sobre balsas superficiales construidas terrenos de permeabilidad moderada/ alta. Se alternan periodos de inundaciones con periodos de sequía, aplicados de forma cíclica, permitiendo la regeneración aerobia de la zona de infiltración y manteniendo una alta capacidad de tratamiento. La capacidad de infiltración varía entre 10-60 cm / día. La superficie necesaria para su construcción varía entre 1-22 m<sup>2</sup>/ hab.

Se utiliza para aguas residuales procedentes de poblaciones de menos de 5000 habitantes equivalente (Mantecón et al, 1991).

Las reducciones obtenidas son del 90% de los SST y de la DQO<sub>5</sub> y del 70-90% de los patógenos.

En las balsas de infiltración normalmente no se coloca vegetación. Sólo se colocaría si la forma de distribuir esa agua, se realiza mediante aspersión, lo que hace necesaria una cubierta vegetal. Esto tiene un problema añadido, si el agua contiene patógenos, pueden originarse aerosoles con microorganismos patógenos.

Otra desventaja es la necesidad de un tratamiento primario antes de la aplicación de esta agua residual, debido a que tiene tendencia a colmatarse rápidamente el lecho filtrante.



Las ventajas encontradas son la recarga artificial de los acuíferos y la posibilidad de poder reutilizar, mediante zanjas o pozos, el agua tratada. (Tabla 6).

Ventajas	Inconvenientes y/o limitaciones
Proporciona un efluente de excelente calidad en cuanto a materia orgánica y sólidos en suspensión	Necesidades de terreno más grandes que los sistemas convencionales (lodos activados)
Nitrificación casi total	Si hay dificultad para encontrar el material del macizo filtrante cerca del lugar de instalación, puede representar un aumento muy importante de los costes de construcción
Desinfección excelente si se dimensiona correctamente	Necesidad de una decantación primaria eficaz
Bajos o nulos requerimientos energéticos	Adaptación limitada a las sobrecargas hidráulicas
Necesita poco personal de mantenimiento Explotación simple pero muy regular	Sensible a heladas persistentes ya que pueden comprometer, entre otros, el funcionamiento hidráulico del sistema
Precio de construcción moderado	Indispensable el control de los periodos de reposo y alimentación
Puede actuar como tratamiento secundario o terciario.	Sensible a la presencia de arcillas y limos (colmatación)

Tabla 6: Ventajas e Inconvenientes de la Infiltración. Fuente: LIFE 11, 2012

#### 4.1.3. ESCORRENTIA

Técnica consistente en el forzamiento de la escorrentía del agua residual sobre suelos con una superficie impermeable y en los que se alternan periodos de riego con periodos de secado. (Murillo et al, 1999). El suelo previamente ha sido acondicionado para ello, mediante una pendiente y con vegetación no arbórea. La dispersión de agua se realiza mediante aspersores, tuberías con orificios o rociadores. Para su aplicación se realiza un pretratamiento en la que eliminamos solidos gruesos y, una vez eliminados, su aplicación se realiza durante varias horas durante 5-7 días a la semana.



Para la realización de la escorrentía superficial, se necesitará tener una serie de condiciones con el terreno (Murillo et al, 1999):

- Suelos impermeables o con un drenaje limitado como pueden ser arcillas o suelos arcillo limosos.
- Pendientes entre 2-8 %
- Superficies lisas para la formación de una lámina sobre el suelo. Entre 10-44 m<sup>2</sup>/hab.

El ámbito de aplicación se encuentra para poblaciones pequeñas, menores de 500 habitantes.

Los rendimientos son del 90% en DBO<sub>5</sub> y del 70% para SST. La reducción del nitrógeno es buena, pero la del fósforo no. Por tanto, su tratamiento es equivalente a un tratamiento secundario o biológico.

#### 4.1.4. LECHO TURBA

El sistema consiste en lechos de turba sobre los que circula el agua residual. Está formado por un lecho de turba en la parte superior, seguido de uno de arena y en la parte inferior uno de grava asentado sobre un terreno impermeable o que ha sido impermeabilizado, evitándose así la contaminación de las aguas subterráneas.

La depuración se realiza a través de absorción y adsorción de la turba, así como de las actividades bacterianas que se dan en la superficie. Es decir, se eliminan mediante procesos químicos, físicos y biológicos.

Los porcentajes de eliminación son del 80% de la DBO<sub>5</sub> y el 90% de los SST.

Este sistema está diseñado para poblaciones menores de 2000 habitantes y cuyas superficies requeridas oscilan entre los 0,6 y 1 m<sup>2</sup>/ hab, no debiéndose superar los 200 m<sup>2</sup> de superficie de cada lecho.

El proceso de turba estará compuesto por un pretratamiento, un tratamiento primario mediante filtros autolimpiables, un secundario formado por los lechos de turba y un terciario, que puede ser opcional, y en el que se eliminarán patógenos mediante lagunajes aerobios o cloraciones.



Como desventaja se tendrá que cada 5-7 años debe de ser reemplazada por una nueva, pero la retirada puede ser aprovechada para fines agrícolas.

Las ventajas encontradas son muy variadas:

- No se produce ningún tipo de olor
- Puede utilizarse en climas fríos
- El rendimiento no se ve afectado si hay sensibles variaciones del caudal
- Soporta puntas de caudal 50 veces mayores al caudal normal
- Adaptación sencilla al paisaje
- Alta descontaminación bacteriana

#### 4.1.5. LECHO ARENA

Sistema consistente en lechos de material granular, con tamaño de grano uniforme, debidamente drenados en el fondo.

Su uso más extendido es para acumulación de aguas que previamente se han tratado con otros sistemas.

Esta tecnología incluye dos tipos de filtros: filtros intermitentes y filtros con recirculación. En filtros intermitentes se vierten de forma intermitente sobre filtros granulares de 0,5-1 m de espesor, mediante tuberías, las aguas a depurar. Los filtros de recirculación se basarán en la mezcla del agua que hemos tratado en los filtros intermitentes con agua nueva sin depurar.

Su rendimiento se verá afectado, principalmente, por la aireación del filtro y por la temperatura ambiente.

La diferencia con los de turba es la composición de la que están formados. Los de turba están compuestos de turba y estos de arena.

Como principal desventaja, no pueden utilizarse como un sistema único de tratamiento de aguas (Ramos et al, 2002), ya que su capacidad de eliminación de  $DBO_5$ , COD y SST es insuficiente, siendo esta una de las principales desventajas respecto de los de turba. Eso sí, pueden ser utilizados como un tratamiento complementario a un sistema de



tratamiento con mayores rendimientos, como pueden ser los anteriormente descritos.

Las ventajas principales con los de turba son su mayor resiliencia a la colmatación, menor volumen y menos coste económico.

## 4.2. ACUÁTICOS

Su funcionamiento básicamente consiste en introducir el contaminante en dicho sistema, donde las plantas y microorganismos lo transforman.

### 4.2.1. LAGUNAJE

Técnica consistente en almacenar aguas en lagunas o estanques de estabilización durante un tiempo determinado, en función de la carga que se le aplique y de las condiciones climáticas, de manera que la materia orgánica sea degradada por los microorganismos presentes en el medio acuático. Dependiendo del nivel de la laguna, se inyectará una pequeña cantidad de agua de forma continua o, si el nivel es bajo, una cantidad superior.

Su aplicación se realiza sobre poblaciones superiores a 200 habitantes, pero se necesitan altas superficies de terreno para su realización, en torno a 6,5 m<sup>2</sup>/ hab.

Hay 3 tipos de estanques de estabilización: anaerobios, facultativos y aerobios o de maduración. Estos tres estanques se encuentran de forma lineal conectados unos con otros, pasando el agua entre ellos y depurándose a medida que va pasando de unos a otros.

#### Anaerobias

La depuración se realiza mediante una fermentación en dos etapas, a través de cuatro grupos microbianos o bacterias (hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y metanogénicas) y en la que se origina metano. En la primera etapa actúan las facultativas y en la segunda las anaerobias estrictas.

El contenido de O<sub>2</sub> en la laguna se mantiene bajo o nulo debido a la alta carga orgánica, a la gran profundidad de las aguas, superior a 2 metros, y al corto tiempo de residencia del agua, entre 1-5 días.



Los rendimientos de eliminación de sólidos por sedimentación y de DQO, por los microorganismos, son del 70% de eliminación.

La capacidad de depuración de este tipo de lagunas puede dar paso a dos posibles opciones. Una primera como tratamiento único de depuración de aguas de una población inferior a 2000 habitantes, que solo requiera tratamiento primario, o una segunda, como una parte de un tratamiento primario en el proceso de depuración.

La desventaja de este tipo de tratamiento es la posibilidad de olores, debidos a un mal diseño o a la superación de 100 mg/l de sulfhídrico en el influente. Esto habría que eliminarlo añadiendo un lecho de carbón activo que lo retenga, lo que elevaría el precio del proceso, debido a la adicción de una acción y a la sustitución del carbón activo cuando se colmate.

#### Facultativas

En este tipo de lagunas se diferencian tres zonas: una zona aerobia en la superficie, una zona intermedia con bacterias facultativas y una zona profunda anaerobia. La principal función de este tratamiento es la degradación de la materia orgánica.

En el proceso aerobio la materia orgánica es degradada en carbono que será utilizado por las bacterias, junto con el fósforo y el nitrógeno, para formar nuevas células.

El oxígeno utilizado para la estabilización de la materia orgánica provendrá de la re-aireación y del desprendido por las algas en la fotosíntesis. Se formará un ciclo cerrado entre las algas y los microorganismos, ya que estas desprenderán oxígeno que será utilizado por los microorganismos, que a su vez desprenden CO<sub>2</sub> que es tomado por las algas. La altura de estas balsas es de 0,5-1 m.

#### Aerobias o de maduración

Tratamiento aerobio en tanques de poca profundidad, entre 0,2-1 metro, con una producción máxima de agua y en las que la masa de agua se encuentra en condiciones aerobias



La principal misión de este tratamiento es la eliminación del exceso de  $DBO_5$  y la desinfección de patógenos, todo ello a través de la radiación ultravioleta solar. El grueso de materia orgánica debe de haber sido estabilizado previamente a través de lagunas anaerobias y facultativas.

En este proceso también se produce nitrificación, cierta eliminación de nutrientes y clarificación y oxigenación del efluente. Con esto se consigue un efluente de una gran calidad. Un inconveniente del proceso es la presencia de algas (sólidos gruesos en suspensión) en el efluente, que pueden ser vertidos a ríos o lagos, lo que puede ser un limitante para el uso de este tipo de tecnología.

El grado de depuración bacteriana vendrá marcado por la retención en la laguna de maduración, así como en el número de lagunas que instalemos. Los valores típicos son entre 7- 10 días con una profundidad de laguna de 1 metro.

Este proceso de tratamiento equivaldría a un tratamiento terciario de depuración de aguas y su instalación, para la obtención de un efluente de gran calidad, vendrá dado para la obtención de un agua de calidad necesaria para el medio receptor o para la reutilización del agua como regadío.

Como ventajas:

- Altos rendimientos de eliminación de  $DBO_5$ , SS, nutrientes y patógenos
- Regulación y almacenaje de agua apta para el riego, ya que cumple tanto las características sanitarias como las de riego.
- La retirada del fango se realiza cada 5-10 años, todo ello dependiendo del agua residual que se trate.

Y como inconvenientes:

- Requerimiento de extensas superficies para su aplicación
- Elevadas pérdidas de agua por evaporación
- En ocasiones se presentan altas concentraciones de algas en las aguas depuradas
- Difícil adaptación a cambios climáticos.

Estos tipos de tratamientos están en regresión, debido a los bajos rendimientos alcanzados, o a la baja calidad del efluente obtenido, todo ello debido a las grandes cantidades de biomasa algal. Aunque, por otra parte, este inconveniente se está viendo revertido, debido a que se está considerando como un sustrato energético.

Su uso actual son lagunas anaerobias en las cabeceras de los tratamientos, para abaratar costes de fangos; y en el uso de lagunas de maduración en las colas de los tratamientos, para homogeneizar vertidos y desinfectar. (Medina et al ,2012)

#### 4.2.2. HUMEDAL

Los humedales son terrenos inundados con profundidades de agua inferiores a 0,6 metros y con plantas emergentes (Ilustración 1 y 8). El agua fluye de forma continuada y la superficie libre está a igual o superior nivel del suelo, manteniendo estados de saturación durante un largo periodo del año. En ellos tienen lugar de forma simultanea procesos químicos, físicos y biológicos, sin requerir aportes de aditivos. El oxígeno es aportado a través de la atmósfera.

El mayor inconveniente son las grandes extensiones de terreno requeridas, debido a que los procesos de degradación que en ellos se producen son de forma lenta.



*Ilustración 1: Humedal Artificial de Empuriabrava (Girona); Fuente: Sistema d'Alguamalls Construlls d'Empuriabrava*

La vegetación existente tiene una gran repercusión positiva, ya que permite:

- Formación de películas bacterianas
- Facilita la filtración
- Facilita adsorción de constituyentes
- Transferencia de oxígeno a la columna de agua
- Limita la entrada de luz solar, lo que permite controlar el crecimiento de las algas.

A continuación, se mostrarán las ventajas e inconvenientes de los humedales (tabla 7):

Ventajas	Inconvenientes y/o limitaciones
<b>Integración en el medio</b>	Ligeramente sensible a la temperatura. Sistemas no recomendables en zonas de climatología extrema con heladas frecuentes
<b>Excelente eliminación de la materia orgánica y sólidos en suspensión</b>	La superficie de diseño es mucho mayor que en los sistemas convencionales (lodos activados)
<b>Poco susceptible a cambios de carga o caudal</b>	Terreno: la pendiente debe ser inferior al 5%
<b>Explotación simple Las operaciones son básicamente trabajos de jardinería</b>	Si la eliminación de sólidos en suspensión en el pretratamiento y/o en el tratamiento primario no es eficiente, puede haber colmatación (especialmente en los de flujo subsuperficial horizontal)
<b>Los sistemas de flujo subsuperficial (en especial los verticales) requieren menos superficie que la mayoría de tratamientos naturales</b>	Pocos factores de control durante la operación
<b>En los sistemas de flujo subsuperficial los problemas de olores e insectos son mínimos</b>	En los humedales de flujo libre puede producirse proliferación de mosquitos
<b>Consumo energético mínimo o nulo</b>	Mantenimiento poco explícito y conocido
<b>Bajo coste de explotación y mantenimiento</b>	
<b>Baja producción de residuos</b>	

Tabla 7: Ventajas e Inconvenientes de los Humedales





Estos sistemas necesitarán obligatoriamente un pretratamiento consistente en un desbaste y en tanques Imhoff, donde se eliminarán sólidos gruesos, finos y en suspensión, seguidos de un tanque de homogeneización. Hay dos tipos de humedales artificiales: FWS (Free Water Surface Wetlands) y SFS (Systems of Subsurface Flow). (Ilustración 2, 3 y 4).

Los procesos de depuración se realizarán a través de procesos físicos como la decantación, químicos como procesos redox y biológico a través de microorganismos y plantas.

### Artificiales

Al ser parte de un sistema proyectado, no están sujetos a limitaciones de vertido.

La estructura de estos humedales está formada por un fondo impermeable sobre el que se asienta un lecho de gravas o suelo, en el que se desarrollarán las plantas que serán el principal agente depurador del sistema.

Se tienen dos tipos de humedales artificiales dependiendo de la superficie del agua: FWS y SFS.

#### a) FWS (FMF) o Superficie libre de agua

Sistema de humedal artificial en el que las plantas están en contacto con la atmósfera y es la principal fuente de oxígeno por aireación.

Las principales ventajas a destacar son la incorporación de un hábitat natural y de un área con posible recreación pública, y posibilidad de una gran efectividad en la remoción de DBO, DQO, SST, metales y compuestos orgánicos de A.R. domésticas teniéndose un tiempo adecuado de retención. (Acero.D., 2014)

Las desventajas son la gran necesidad de extensión de terreno, sobre todo si hay que realizar una remoción de nitrógeno; acumulación y adición al sustrato, con el tiempo, de los metales pesados, fósforo y algunos compuestos persistentes; baja tasa de remoción en climas fríos; limitación de nitrificación rápida del amoníaco por creación de sistema anóxico en los humedales de flujo superficial; aparición de mosquitos y

otros insectos que pueden ser considerados como vectores potenciales de enfermedades. (Acero.D., 2014) (Ilustración 3)

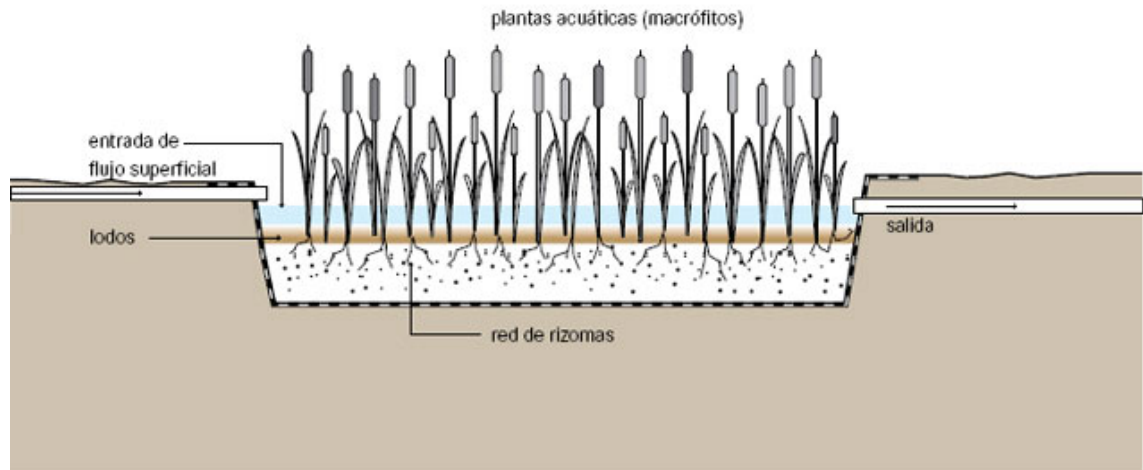


Ilustración 2: Humedal Artificial de Flujo Libre

#### b) SFS(FHS) o Flujo subsuperficial

Sistema de humedal artificial en el que la superficie del agua se mantiene al mismo nivel o por debajo de la superficie del lecho permeable. Es una tecnología muy reciente en España en comparación con otros países, llegándose a ver que el 80 % de estos humedales se ha construido en los últimos 5 años. (Puigut et al, 2007).

Las principales ventajas son:

- Mayor protección térmica
- Posibilidad de gran efectividad en la remoción de DBO, DQO, SST, metales y compuestos orgánicos de A.R. domésticas, teniéndose un tiempo adecuado de retención
- Eliminación de la aparición de vectores de enfermedades, como pueden ser mosquitos, si el sistema opera de forma adecuada y se mantiene el flujo subsuperficial. (Acero.D., 2014)



Las principales desventajas son:

- Acumulación y ligación al sustrato, con el tiempo, de los metales pesados, fósforo y algunos compuestos persistentes
- Aparición de vectores de enfermedades si el sistema no se trata de forma adecuada, aunque la probabilidad es muy inferior respecto al de flujo superficial
- Limitación de nitrificación rápida del amoníaco por creación de sistema anóxico en los humedales de flujo superficial
- Altos costos asociados a la construcción del medio poroso.  
(Acero.D., 2014)

Dentro de estos humedales se tendrán dos tipos: horizontales y verticales.

Los humedales de tipo horizontal, están viendo reducida su implantación frente a los verticales, debido a los problemas de colmatación detectadas en zonas de filtración cercanas a la alimentación de los mismos, a mayores requerimientos de terreno y menores rendimientos respecto a los verticales. (García et al, 2007). (Tabla 8 e ilustraciones 3 y 4).

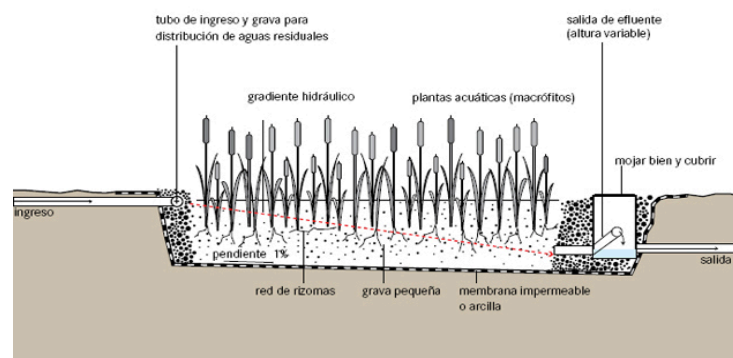


Ilustración 3: Humedal Horizontal

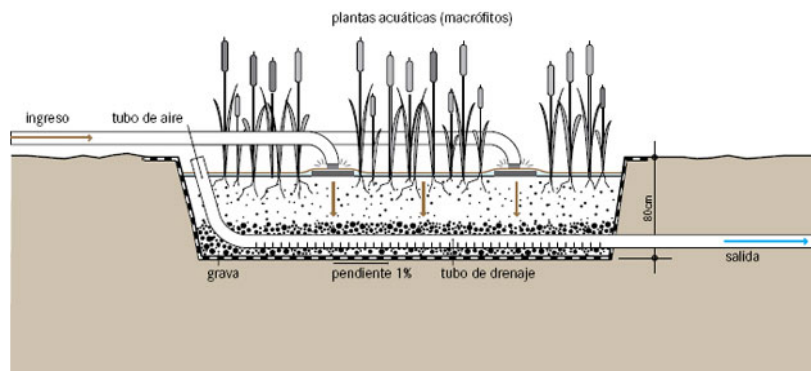


Ilustración 4: Humedal Vertical

SFS	HORIZONTAL	VERTICAL
Cargas Orgánicas aplicadas (g DBO <sub>5</sub> / m <sup>2</sup> *d)	0,8-23	22,8-29,8
Eliminación de la DBO <sub>5</sub> (%)	80	95
Eliminación Nutrientes (%)	No muy elevada	No muy elevada
Eliminación N-orgánico (%)	52	52
Eliminación N-amoniacal (%)	40	40
Eliminación P-total (%)	43	43

Tabla 8: Características de los SFS Horizontales y Verticales. Fuente: Medina et al, 2012

Un empleo muy cotidiano de los humedales de flujo vertical, es como deshidratadores de fangos generados en las estaciones depuradoras de aguas residuales. (Ilustración 5). Estos fangos se irán añadiendo de forma paulatina a estos humedales, cultivados con carrizo. (Begg et al ,2011). Los lixiviados obtenidos se retornan a la cabecera y las cargas superficiales de fangos que se recomiendan se encuentran entre los 50-60 Kg SS/m<sup>2</sup>\*año.

Los grados de sequedad del fango se encuentran en torno al 16-30 %, similares a los obtenidos con los tratamientos convencionales y la eliminación de sólidos totales en la relación SV/ST es del 30-49%.

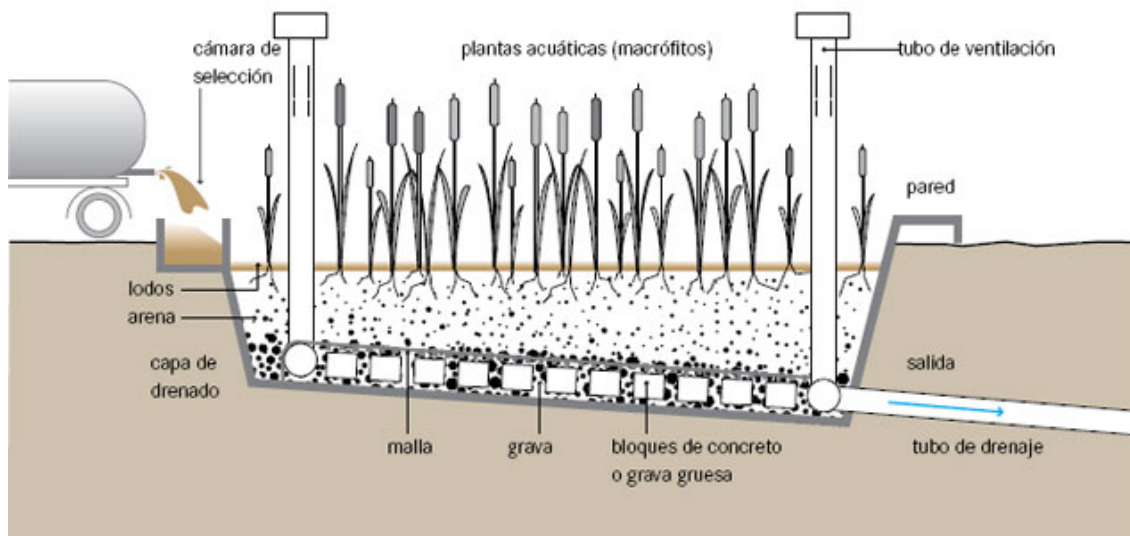


Ilustración 5: Corte transversal de un Humedal Artificial para el secado de lodos

En cuanto a los parámetros de diseño de los humedales de flujo libre y los de flujo subsuperficial, se tendrán grandes diferencias entre ambos.

Los de flujo libre tienen como ventaja un tiempo de entrada en funcionamiento de 1 periodo vegetativo. Mientras que las desventajas que se encuentran en este tipo de tratamientos son un tratamiento fitosanitario de forma continuada, muchas fases de pretratamiento y, a veces, altas densidades de población inicial, llegando incluso de 40 plantas/ m<sup>2</sup>.

Los de flujo subsuperficial tienen como ventajas un mantenimiento de sesgado de 2-3 veces al año, menores densidades de plantación inicial, 10 plantas /m<sup>2</sup> y menores fases de pretratamiento. En cuanto a las desventajas, la principal es que se necesita, a veces, 1 año para alcanzar el máximo rendimiento para su correcto funcionamiento. (Ver tabla 9).

Parámetro	Sistema FMF	Sistema FHS
Superficie de plantación requerida (m <sup>2</sup> /he)	1 – 3	1,5 – 2,5
Tiempo de retención hidráulica (d)	7,5 – 10	> 5
Lugar de ubicación de las macrofitas	Balsas	Canales de anchura entre 2,5 y 4 m
Profundidad lámina de agua (m)	0,5 – 5	> 0,5
Plantas	Macrofitas emergentes	Fundamentalmente enneas o esparganios
Densidad de plantación inicial (plantas/m <sup>2</sup> )	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 9: Parámetros de diseño de los sistemas FMF y FHS. Fuente: Medina et al, 2012



También se podrán encontrar Humedales Híbridos, que son combinaciones de los anteriores humedales, compuestos por diferentes lechos, donde el agua circula de forma subsuperficial y expuesta a la atmósfera. Su configuración dependerá de los objetivos a los que queramos llegar, las características del agua, las condiciones de operación y la disponibilidad económica que se tenga. Se podrá realizar una recirculación del agua en diferentes puntos del sistema, con lo que se mejorará la calidad del agua y se realizará el proceso más efectivo. (ARIAS.C., BRIX.H, 2003)

A continuación, se explicará cómo se eliminan los diferentes contaminantes como la DBO, SS, N, P, Metales y patógenos.

#### 1.1.1. Mecanismos de eliminación

##### 1.1.1.1. DBO

La eliminación se realiza de forma rápida. En los humedales FWS se elimina 50% mediante la estanqueidad y en los SFS es eliminada en los primeros metros del humedal. El resto de la DBO que queda, en estado coloidal, es eliminada mediante la actividad microbiana. La eliminación es aerobia en la superficie de los FWS y en las raíces y rizomas en los SFS. En el resto del humedal prevalecen las condiciones anaerobias y se descomponen mediante ellas.

La eliminación de la DBO está influenciada por el clima. En los climas cálidos, los primeros días es eliminada de forma rápida, pero, en los sucesivos días, esta eliminación se limita. Esto es debido a la DBO residual proveniente de la descomposición de los residuos propios de la planta y de materia orgánica propia del humedal. Esto hace que la eliminación de DBO nunca pueda ser del 100%, ya que son sistemas que originan su propia DBO natural, lo que hace imposible diseñar humedales que la eliminen por completo. La DBO de salida estará entre 2-7 mg/l.



### 1.1.1.2. SS

La eliminación de sólidos suspendidos es muy efectiva y rápida en ambos sistemas, obteniéndose efluentes con concentraciones inferiores a 20 mg/l.

Obtenemos siempre valores inferiores a los de referencia, independientemente de la concentración con la que entre.

Hay que tener una serie de puntualizaciones en los humedales SFS. Una muy importante es la posible obstrucción por parte del sustrato, que ocasionarían un descenso de la conductividad hidráulica. Se da sobre todo en humedales cuya introducción del caudal se realiza por entradas sumergidas, siendo una solución la colocación de estas sobre el sustrato.

Según diversas investigaciones, se ha visto que sigue el mismo modelo que en la eliminación de la DBO. Por lo consiguiente, podremos esperar una eliminación similar de SS cuando diseñemos un sistema de eliminación de DBO. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002).

### 1.1.1.3. Nitrógeno

La eliminación del Nitrógeno en ambos sistemas puede llegar a ser muy efectiva, en torno al 80%, siendo eliminada una pequeña parte por la planta y en torno a un 10-15% a través de las podas.

El nitrógeno que entra se mide a través de Nitrógeno Orgánico y amoniacal (la combinación de ambos da el NKT), nitrato y nitrito.

El desarrollo de potencial de eliminación del nitrógeno es lento hasta alcanzar el equilibrio, requiriéndose 2 o 3 etapas de crecimiento de la planta y sistema de raíces.

Durante los meses de verano, se tendrán diferentes tipos de nitrógeno según la aireación del sistema.

En lagunas facultativas habrá bajas concentraciones de Amoniacal pero altas concentraciones de Orgánico en el efluente. Esto es debido a las algas que salen por el efluente.

En sistemas secundarios aireados contienen altos niveles de Amoniacal y nitratos, pero bajos niveles de Orgánico.

Por último, en sistemas con alta intensidad de aireación o prolongada, la mayoría estará en forma de nitrato.





El nitrógeno Orgánico que entra en el humedal está asociada a los sólidos orgánicos del AR y a las algas. Gran parte de este Nitrógeno es descompuesto o mineralizado, siendo contenido en el agua en forma de amoniacal. Se pueden producir descargas estacionales de amoniaco, por parte de la planta o de materiales orgánicos producidos por el humedal de forma natural.

El mejor método para la eliminación del amoniaco es la nitrificación biológica seguida de un proceso de desnitrificación.

El proceso de nitrificación sucede cuando se ha eliminado la mayoría de la DBO, con condiciones aerobias, con una temperatura adecuada y suficiente alcalinidad. Así los organismos nitrificantes pueden competir con los heterótrofos por el oxígeno que se encuentre disponible.

La relación teórica nos indica que se necesitan 4,6 g de oxígeno para poder oxidar 1 g de N amoniacal.

La disponibilidad de oxígeno es la base para una correcta eficiencia de estos sistemas de una u otra manera, siendo la transferencia con el oxígeno atmosférico en los FWS y la penetración de las raíces y la eficiencia de transferencia en el SFS.

En los climas cálidos los tiempos de retención para lograr una nitrificación eficiente serán de 6-8 días. También las temperaturas afectarán a la eliminación del amoniaco, siendo alta con temperaturas cálidas y decreciendo su efectividad a medida que bajan las temperaturas. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

La alcalinidad de las aguas residuales normalmente es la suficiente. Es necesaria para que las reacciones biológicas de nitrificación puedan darse y la relación teórica aceptada es 7,1 g de alcalinidad por 1 g de  $\text{NH}_4^+$ - N oxidado.

La eliminación de nitratos a partir de la desnitrificación biológica requiere de condiciones anóxicas con una temperatura y fuente de carbono adecuada.

La fuente de carbono es la base de este proceso, ya que normalmente en todos los humedales tendremos condiciones anóxicas y la temperatura dependerá de la zona.

Se podrán añadir fuentes de carbono como metano, pero es muy costoso. En la mayoría de los sistemas se utiliza la desnitrificación a partir de microorganismos naturales del sistema. Otra gran fuente de carbono son los



residuos de las plantas y organismos naturales presentes en los bentos. Teniendo los humedales flujo libre ventaja ya que la caída de las hojas tiene descomposición rápida, respecto de los de flujo subsuperficial, donde los residuos se quedan en la superficie del suelo.

Anteriormente se comentó que se eliminaba la mayoría de la DBO, por lo que puede que las cantidades que se encuentren sean insignificantes. La relación teórica es de 5-9 g de DBO para desnitrificar 1g de  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Aquí es donde toma gran importancia los restos orgánicos de las plantas y los microorganismos de los bentos. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

#### *1.1.1.4. Fósforo*

En la mayoría de los sistemas no es muy eficaz la eliminación del fósforo, debido al escaso contacto entre el agua residual y el suelo.

Una solución para incrementar la eficiencia de eliminación del fósforo, es cambiar los lechos de gravas por los de arena, pero esto requiere tener amplios terrenos. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

#### *1.1.1.5. Metales*

La eliminación de este tipo de contaminantes es similar a la que se produce para el fósforo, incluyendo asimilación, adsorción y precipitación por las plantas.

Los dos humedales tienen la misma capacidad de eliminación y este tipo de contaminantes no presentan ningún riesgo, debido a que su concentración en aguas residuales no es alta para el hábitat. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

#### *1.1.1.6. Patógenos*

La eliminación de patógenos se realiza con tiempos hidráulicos de retención de 3-7 días, aunque las mayores efectividades se alcanzan con tiempos de 14 días.

Muchos sistemas presentan desinfección al final del proceso y sistemas de grava que reducen las concentraciones. Con esto se evita la repercusión negativa que originan picos de caudal altos de lluvias. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

### 1.1.2. Rendimiento

Los rendimientos alcanzados en un humedal son altos en cuanto a la DBO, SS y el N. También se eliminan, aunque en menor medida, los metales, los patógenos y el fósforo, teniendo este último bajos valores de eliminación debido a que su contacto con el suelo es mínimo.

El tratamiento mediante humedales está basado fundamentalmente en sedimentación, precipitación química, absorción, la interacción biológica y la captación por parte de la planta. (Ilustración 6).

Las plantas elegidas serán juncos, carrizos y espadañas. (Ver en apartado de Humedal).

Se tendrá también una parte denominada fracción refractaria, que son partes de la planta que se descomponen y pasan a formar parte de la materia orgánica. Esta fracción se le denomina refractaria y es eliminada de forma permanente por el humedal, llegando a formar la turba del humedal. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

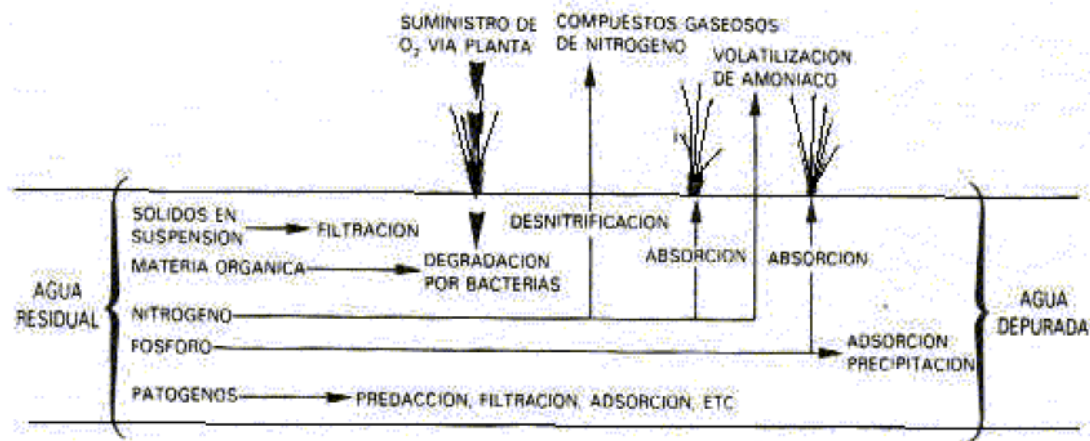


Ilustración 6: Procesos dados en los humedales artificiales. Fuente: García et al, 1997

Se puede ver las diferencias entre los diferentes humedales para depurar los diferentes contaminantes (Tabla 10):

Contaminante	SPA <sup>1</sup>	HFS <sup>2</sup>	HFSS <sup>3</sup>	HFV <sup>4</sup>
Materia orgánica	Conversión biológica por intervención de las bacterias aerobias, facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y a los detritos.	Reducción de la DBO soluble por conversión biológica por efecto de bacterias aeróbicas, facultativas y anaerobias que crecen en la superficie de las plantas y sobre los detritos. La DBO particulada se elimina por absorción, por filtración y por sedimentación.	Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a las superficies de las plantas y los detritos del medio de relleno del humedal.	Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a las superficies de las plantas y detritos.
Materia en suspensión	Sedimentación	Filtración y sedimentación	Filtración y sedimentación	Filtración
Nitrógeno	Procesos de nitrificación/desnitrificación.	Procesos de nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.	Nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización.
Fósforo	Reducción por precipitación y por asimilación por plantas y microorganismos.	Reducción por sedimentación y por asimilación por medio de las plantas y microorganismos.	Por filtración, sedimentación, adsorción, por asimilación por parte de las plantas y microorganismos.	Filtración, sedimentación, absorción y asimilación por las plantas.
Metales pesados	Sedimentación, por absorción y absorción por plantas.	Absorción a las plantas, superficie de detritos y por sedimentación.	Absorción a las raíces de las plantas y los detritos, sedimentación.	Absorción a las raíces de las plantas, sedimentación y filtración.
Trazas de contaminantes orgánicos	Volatilización, absorción y biodegradación.	Volatilización, absorción, biodegradación.	Absorción, biodegradación.	Volatilización, absorción, biodegradación.
Patógenos	Muerte natural, radiación UV. Depredación por otros organismos.	Muerte natural, depredación, radiación UV, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.	Por muerte natural, por depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas.	Muerte natural, depredación, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas.

Tabla 10: procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en SPA: sistemas de plantas acuáticas, HFS: humedales de flujo superficial; HFSS: humedales de flujo subsuperficial; HFV: humedales con flujo vertical. (ARIAS.C., BRIX.H., 2003)

A continuación, se verá el reparto de los diferentes humedales artificiales subsuperficiales en España (Ilustración 7):

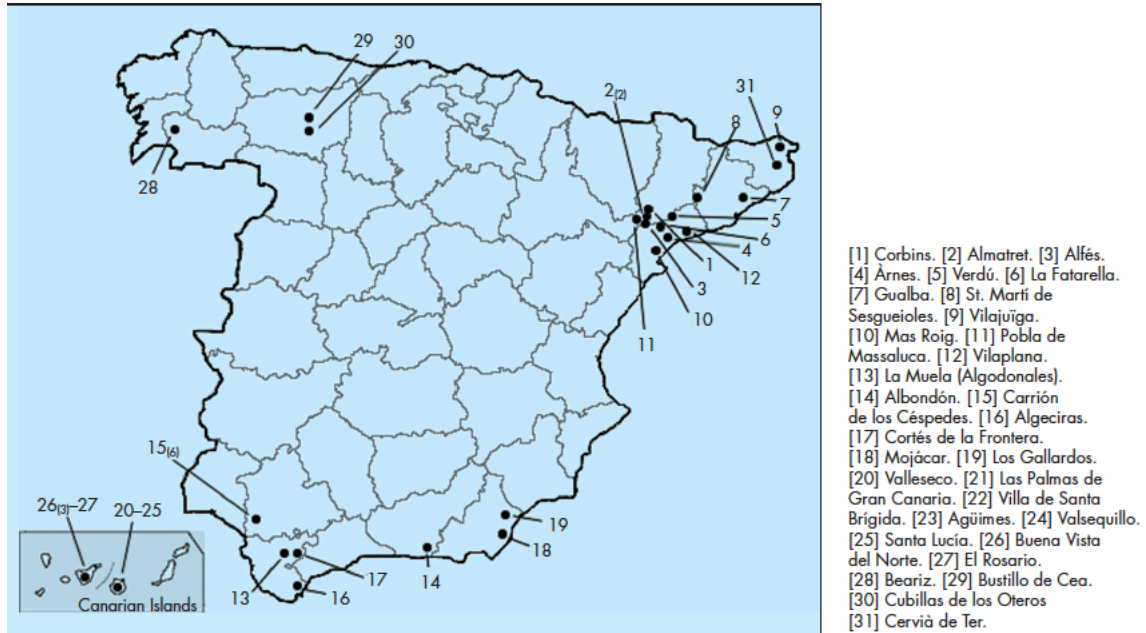


Ilustración 7: Distribución geográfica de los humedales artificiales de flujo subsuperficial. Fuente: Medina Y.F.; 2012



Ilustración 8: EDAR de Fabara (Zaragoza). Fuente: ETS Ing. Agrónomos. UPM



En la actualidad se aplican para tratar aguas residuales tanto urbanas como industriales, sistemas de drenaje sostenible, deshidratación de fangos y para restaurar ecosistemas acuáticos.

Estos sistemas son ideales para implantarse en sistemas rurales, sin alcantarillado, con grandes extensiones de terreno o en industrias que generen aguas con efluentes orgánicos y muy biodegradables, como pueden ser industrias agroalimentarias o depuración de aguas ácidas como pueden ser las generadas en minas o de lluvia.

El creciente interés en la implantación de este tipo de sistemas ha venido dado por:

- Alta eficacia con un alto grado de eliminación de contaminantes
- Bajos costes de operación, inversión y mantenimiento
- A veces se puede conseguir agua reutilizable si se realizan los tratamientos secundarios y terciarios adecuados
- Aporte de oxígeno
- Sin generación de fango
- Soportan variaciones de caudal y carga contaminante
- Fácil integración en el paisaje y en los seres vivos de este
- Utilización como educador ambiental

## CRITERIOS DE ELECCIÓN DE LAS PLANTAS

Los criterios, en los que se basará, serán:

- Plantas adaptadas a la zona donde se quiera implantar, siendo las especies locales las más adecuadas para la realización de estos proyectos.
- Tolerancia a los contaminantes a las que serán expuestas
- Gran crecimiento con un extenso sistema radicular, con esto se consiguen grandes cantidades de biomasa, lo que indica gran asimilación y facilidad de crecimiento de la planta.
- Tener buen sistema de aireación hacia las raíces, facilitando la nitrificación y los procesos aerobios.



También habrá que tener en cuenta los factores condicionantes:

- Tipo de humedal
- Temperatura de la zona
- Superficie del humedal o de los humedales que utilizaremos
- Profundidad que tenga la instalación
- Composición que forme el vertido
- Evolución que tengan los rizomas
- Recolección o no de la vegetación que utilicemos
- Tipo de sustrato sobre el que vaya a asentar

Las plantas elegidas serán macrófitas flotantes como jacintos o lentejas de agua o macrófitas emergentes como espadañas, juncos o carrizos.

### 1.1.3. CULTIVO ACUÁTICO O MACRÓFITAS EN FLOTACIÓN

Es una variante de los humedales FWS o Flujo Superficial en los que se introducen cultivos de plantas flotantes, cuya función principal es la eliminación de contaminantes a través de las raíces, siendo una parte fundamental en el tratamiento. (Moreno et al, 2003).

Las profundidades del agua varían entre 0,5-1,8 metros, siendo superiores a los de los humedales.

Las cargas orgánicas que estos procesos pueden llegar a sostener son del orden de 30-50 Kg/ha/ día, lo que representa una carga hidráulica de 6m/año en aguas moderadas. (Moreno et al, 2003).

La desventaja de este método es el clima, que es un factor limitante en el rendimiento, debido a que el crecimiento de las plantas se realiza a determinadas temperaturas, entre 15-25°C. (Moreno et al, 2003).



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## 5. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS NATURALES DE DEPURACIÓN DE A.R. Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para ver claras las diferencias entre todos los tratamientos de tecnologías blandas, tanto en terreno como acuáticos, se mostrarán a continuación las tablas (Tablas 11, 12, 13) con las características de las tecnologías blandas unas respecto a las otras.

Características	Filtro Verde	Infiltración Rápida	Escorrentía Superficial	Lechos de Turba	Lagunajes	Humedales	Cultivos Acuáticos
<b>Limitaciones climáticas</b>	Suele ser necesario disponer de instalaciones de almacenamiento durante las lluvias y en tiempo frío	Ninguna (posibles modificaciones en la explotación en condiciones de tiempo frío)	Suele ser necesario Disponer de Instalaciones de Almacenamiento Durante las lluvias y en tiempo frío	Ninguna (se puede utilizar incluso en climas muy fríos)	Dificultad de adaptación a los cambios climáticos (las variaciones de temperatura pueden obligar a hacer más profundos los estanques)	En clima frío puede ser necesario almacenar el agua	En clima frío puede ser necesario almacenar el agua. La posibilidad de utilización de las plantas está directamente relacionada con el clima.
<b>Profundidad hasta el nivel freático</b>	0,6-0,9m (mínimo)	3m (en los casos en los que exista drenaje se pueden adoptar profundidades menores)	No crítica		No crítica	No crítica	No crítica
<b>Pendiente</b>	Inferior al 15% en terrenos cultivados e inferior al 40% en terrenos no cultivados	No es un factor crítico; las pendientes demasiado pronunciadas obligan a grandes movimientos de tierras	Pendientes del 1-8%, máximo 15%		Normalmente inferior al 5%	Normalmente inferior al 5%	Normalmente inferior al 5%
<b>Permeabilidad del suelo</b>	De moderadamente baja a moderadamente alta	Alta (arenas, arenas margosas)	Baja (arcillas, limos y suelos con barreras impermeables)	Baja (de lo contrario hay que recurrir a la impermeabilización)	Baja a moderada	Baja a moderada	Baja a moderada

Tabla 11.: Características de ubicación de los sistemas de tratamiento naturales. Fuente: Medina Y.F.; 2012

Características	Filtro Verde	Infiltración Rápida	Escorrentía Superficial	Lechos de Turba	Lagunajes	Humedales	Cultivos Acuáticos
<b>Técnicas de aplicación</b>	Aspersión o superficial <sup>a</sup>	Generalmente superficial	Aspersión o superficial	Superficial	Superficial	Aspersión o superficial	Superficial
<b>Carga hidráulica anual (m/año)</b>	1,70-6,0	6,0-100	7,3-56,7			5,5-18	5,5-18
<b>Superficie necesaria<sup>b</sup> (m<sup>2</sup>/hab)</b>	10-90	1-22	10-44	0,6-1	6,5		
<b>Pretratamiento o mínimo necesario</b>	Sedimentación primaria <sup>c</sup> . Desbaste	Sedimentación primaria. Desbaste	Desbaste	Desbaste a través de filtros autolimpiables	Desbaste.	Sedimentación primaria. Desbaste	Sedimentación primaria. Desbaste
<b>Evacuación del agua residual aplicada</b>	Evapo-Transpiración y percolación	Principalmente percolación	Escorrentía superficial y evaporación con algo de percolación	Drenaje en la base del sistema		Evapo-transpiración, percolación y escorrentía superficial	Algo de evapo-transpiración
<b>Vegetación</b>	Necesaria	Opcional	Necesaria	No necesaria	No necesaria	Necesaria	Necesaria

Tabla 12: Características de los diseños de los diferentes sistemas de tratamiento naturales. Fuente: Medina Y.F.; 2012

SISTEMA DE TRATAMIENTO	RENDIMIENTOS (%)					PRODUCCIÓN DE FANGOS	RECOGIDA DE FANGOS
	DBO <sub>5</sub>	DQO	SS	P	N		
Filtro Verde	90-95	90-95	95-99	85-90	90-95	No	No
Infiltración Rápida	90-95	70-80	90-95	25-40	30-95	Reducida	> 6 meses
Escorrentía Superficial	90-95	60-70	70-80	20-30	45-50	No	No
Lechos de turba	80-85	80-85	90-95	10-30	10-50	0,5-1	> 1 año
Lagunajes	80-95	60-80	70-90	40-60	55-85		5-10 años

DBO<sub>5</sub>: Demanda bioquímica de oxígeno, DQO: Demanda química de oxígeno, SS: Sólidos en suspensión, P: Fósforo en cualquiera de sus formas, N: Nitrógeno en cualquiera de sus formas.

Tabla 13: Comparación en el rendimiento de los diversos sistemas naturales de depuración de aguas residuales urbanas. Fuente: Medina Y.F.; 2012

En cuanto a rendimientos (Tabla 13) se ve que el que más porcentaje de eliminación en general de todos los contaminantes tiene son los filtros verdes, que, además, tienen la ventaja de no producir fangos. Los menos efectivos son la escorrentía superficial y los lechos de turba, donde los porcentajes de eliminación de P y de N son muy bajos.

Los lagunajes son los que mayor cantidad de fango producen, retirándose este cada 5-10 años. (Medina Y.F.; 2012)

En cuanto al diseño (Tabla 12), los que mayores superficies de terreno necesitan son los Filtros Verdes, del orden de 10-90 m<sup>2</sup>/hab y con una necesidad de vegetación y de un pretratamiento de desbaste y sedimentación primaria.

En lo referido a la ubicación (Tabla 11), la mayoría se ven limitado por las condiciones climáticas, sobre todo, para climas fríos, obligando a almacenar agua en lagunas o tanques de homogeneización, facilitando la acumulación de agua y su posterior vertido, para depurar, de forma continuada. Los lechos de turba no se verán afectados por ello, ni la infiltración rápida, que puede ser modificada para ello.

La profundidad del nivel freático solo afectará a los filtros verdes y a la infiltración. En los filtros verdes se necesitará un nivel freático entre 0,6-0,9 metros como mínimo y en la infiltración de 3 metros. (Medina Y.F.; 2012)

En cuanto a la pendiente, será necesaria una ligera pendiente, en torno al 5%, en todas las tecnologías, excepto en la infiltración.



Por último, la permeabilidad será de baja- moderada en todas excepto en la infiltración, que será alta debido a las arenas.

En cuanto a los problemas que puedan ocasionar a poblaciones cercanas, los lechos de turba serán los que menos impacto tengan, por el contrario, los lagunajes, serán los que más repercusión tengan, por la formación de malos olores que en ellos se puedan ocasionar.

Las variaciones de carga y de caudal, los sistemas de aplicación de terreno son las que peor absorberán esas variaciones de caudal, aunque dentro de ellos, los lechos de turba pueden absorber bien estas variaciones.

En general, se puede decir que los sistemas naturales de eliminación de contaminantes en aguas residuales tienen una serie de ventajas e inconvenientes. (Medina Y.F.; 2012)

Entre las ventajas se encuentran:

- Eliminación de patógenos. Es recomendable su utilización en zonas sensibles desde el punto de vista ambiental o donde se quieran reutilizar las aguas residuales.
- Economía de funcionamiento, se necesita poco gasto energético ya que se emplean formaciones vegetales o suelos
- Se amoldan bien al paisaje

Y entre las desventajas:

- Necesidad de gran extensión de terreno
- Posibilidad de contaminación del medio en el que se ubiquen, por un mal dimensionamiento, mal funcionamiento, mala gestión o incorrecto emplazamiento. Se suelen utilizar por encima de su capacidad de depuración. Otro condicionante que puede originar la contaminación es la alta sensibilidad de estas tecnologías al superarse la capacidad de carga. (Salgot et al, 1992).



Una vez comparadas las diversas alternativas y vistas sus ventajas e inconvenientes, se seleccionan como alternativas a diseñar el humedal y el filtro verde, debido a que son los tratamientos con mayores rendimientos de eliminación, sobretodo en fósforo y nitrógeno, no generan vectores de infección y se pueden utilizar como elementos educativos ambientales.

En España la causa del fracaso de estas tecnologías en sus inicios, radicó principalmente en los malos dimensionamientos que se realizaron, provocando que las instalaciones funcionaran con cargas superiores a las que podían. A esto se le unió el incremento de la población junto con el aporte de cargas industriales, lo que hacía que se superaran las capacidades de cargas y los sistemas fallaran.



## 6. CONTAMINANTES EMERGENTES Y SU ELIMINACIÓN A TRAVÉS DE HUMEDALES

Los contaminantes emergentes son contaminantes que a lo largo de los años han pasado de manera desapercibida en las aguas residuales, pero que en los últimos años se han incrementado su estudio, en gran medida, por la aparición de nuevas tecnologías de análisis más sensibles, que han alertado de la presencia de estos contaminantes, potencialmente peligrosos y por las posibles consecuencias que puedan dar origen. Este tipo de contaminantes tienen una amplia variedad, siendo los principales los plaguicidas polares, fármacos, productos de higiene personal, drogas de abuso, metabolitos, retardantes de llama bromados, etc.

Especialmente interesante y alarmante es el caso de los fármacos, más concretamente de los disruptores endocrinos, que pueden dar origen a alteraciones de crecimiento, desarrollo, reproducción y comportamiento de seres vivos, llegando incluso a la feminización en organismos acuáticos. En los fármacos destacan los analgésicos/antiinflamatorios como el Ibuprofeno y el Diclofenaco. (Roig J.,2015)

Este tipo de contaminantes son compuestos con una elevada producción y consumo, lo que ocasiona que no necesiten ser persistentes en el medio para ocasionar efectos negativos (Petrovic et al, 2003).

El tratamiento de estos contaminantes, debido a los altos costes de las instalaciones convencionales, han hecho que se apueste por métodos naturales, más baratos y con menores costes de personal y de energía.

### 6.1. EFECTOS SOBRE LOS SERES VIVOS

Los efectos que estos contaminantes ocasionan a los seres vivos se centran en su mayoría en la alteración del sistema endocrino y en la perturbación o bloqueo de las funciones hormonales.

Como ejemplos, se encontrarán: en el diclofenaco, viéndose que puede llegar a afectar a los tejidos de las branquias y de riñones en peces. Los DDT provocan adelgazamiento de la cascara de los huevos de diferentes especies, daños en la



función reproductiva en humanos y cambios en el comportamiento. (Colborn et al, 1995).

O la penicilina que puede causar resistencia en patógenos bacterianos (Witte et al, 1998).

## 6.2. CONTAMINANTES EMERGENTES MÁS COMUNES

Dentro de los contaminantes emergentes se destacarán los que aparecen con mayor asiduidad. Estos serán los retardantes de llama bromados, parafinas cloradas, plaguicidas polares y metabolitos, compuestos perclorados, fármacos e higiene personal y drogas.

### 6.2.1. Retardantes de llama bromados

Compuestos empleados en un amplio rango de productos comerciales de muy diverso ámbito, tanto muebles como pinturas, plásticos, tejidos o aparatos electrónicos.

Son compuestos con gran ubicuidad, detectándose tanto en muestras humanas como animales o medioambientales y en zonas a gran distancia de la zona de producción o uso. Además, son persistentes, biodisponibles y sus efectos nocivos no están del todo determinados, lo que los hace peligrosos y sobre los que se adoptan medidas legislativas para controlarlos en aguas a nivel europeo. (Roig.J.,2012)

### 6.2.2. Parafinas cloradas

Son formulaciones industriales formadas por mezclas determinadas de alcanos de cadena lineal policlorados, con cadenas hidrocarbonadas entre 10 y 30 C y con porcentajes de cloro entre 30-70%.

Las principales características que poseen son su baja presión de vapor (6-10 mm de Hg), alta viscosidad, propiedades de estabilizantes químicos y retardantes de llama. Esto les ha llevado a ser aditivos en lubricantes y fluidos de corte en carpinterías de carácter metálico, industria del automóvil, en adhesivos, pinturas y plastificantes de materiales de PVC. (Roig.J.,2012)

Son sustancias de características tóxicas para los microorganismos acuáticos, siendo bioacumulables, persistentes, degradación lenta y posible



transporte a grandes distancias. Además, tienen baja volatilidad, solubilidad en el agua y carácter lipofílico, hacen que sea fácil su adsorción en los sedimentos.

En la UE han sido limitado su uso y comercialización, así como incluido en la lista de sustancias prioritarias en las aguas de la UE.

Al ser sustancias de origen artificial, los niveles que encontrados en el medio son resultado de su uso y producción. (Roig.J.,2012)

### 6.2.3. Plaguicidas polares y metabolitos

Son productos polares cuyo principal peligro son los productos que se originan de su degradación, pudiendo ser estos más tóxicos y ubicuos.

### 6.2.4. Compuestos perfluorados

Compuestos de amplia distribución y peligrosidad. Los dos principales son el perfluorooctano sulfonato o PFOS y el ácido perfluorooctanoico o PFOA. (Tabla 14).

Se han detectado en hígado y sangre humana, animal y en aguas tanto subterráneas como superficiales. (Roig.J.,2012)

COMPUESTO	USO	PELIGROSIDAD
<b>PFOS</b>	Refrigerante, detergente, polímero preparados farmacéuticos, retardantes de llama, lubricantes, cosméticos adhesivos, insecticidas	Tóxico Persistente Tendencia a bioacumularse
<b>PFOA</b>	Fabricación de fluoroelastómeros (PVDF) y fluoropolímeros (PTFE), alfombras, tejidos, automóviles y recipientes de alimentos	Tóxico Persistente carcinogénico

Tabla 14: Compuestos perfluorados, usos y peligrosidad. Fuente: Roig.J., 2012



### 6.2.5. Fármacos y productos de higiene personal

Este tipo de contaminantes, es el más abundante y usado en la UE, siendo cifrado su consumo de 1 tonelada al año. Su empleo esta comparado a las cantidades utilizadas de plaguicidas. (Tabla 15).

TIPOS	FARMACOS MAS UTILIZADOS
<b>Analgésicos/antiinflamatorios</b>	Ibuprofeno, diclofenac
<b>Antiepilépticos</b>	carbameceptina
<b>Antibióticos</b>	Amoxicilina, sulfametoxazol, cloranfenicol
<b>Beta-bloqueantes</b>	metoprolol
<b>Veterinaria</b>	Acuicultura, ganadería, avicultura

Tabla 15: Tipos de Fármacos y los más utilizados. Fuente: Roig.J., 2012

Estos contaminantes al alcanzar el agua pueden pasar a las aguas subterráneas o quedar retenidas en los suelos, acumulándose y afectando a los ecosistemas y pasando a la cadena trófica, llegando incluso, a afectar a los seres humanos.

En las aguas las concentraciones que se encuentran son de ng/L y en los suelos de g/Kg. (Roig.J.,2012)

Muchos de estos fármacos están siendo estudiados detenidamente y considerados por la US EPA, como candidatos potenciales a incluirse en listas de contaminantes orgánicos prioritarios en aguas potables.

En la UE no se han fijado, de momento, límites máximos para este tipo de contaminantes en el agua potable, aunque en un futuro serán regulados. (Roig.J.,2012)





### 6.2.6. Drogas

El estudio de este tipo de contaminantes es muy escaso y los que se han realizado tienen dos objetivos, por un lado, determinar la presencia, destino y efectos posibles, así como sus metabolitos en el medio acuático. Por otro lado, estimar el consumo de drogas en las áreas donde se han realizado las investigaciones, a partir de los datos ambientales obtenidos de las aguas residuales o superficiales.

## 6.3. ELIMINACIÓN A TRAVÉS DE HUMEDALES

La eliminación de contaminantes a través de tratamientos naturales son alternativas viables a los tratamientos convencionales, más costosos en cuanto energía y mano de obra.

Estos sistemas necesitan la misma cantidad de energía por kilogramo de contaminante degradado que las tecnologías convencionales, a diferencia de estas, esta energía es obtenida de la naturaleza a través de la luz solar, cinética del viento, química de la biomasa y del suelo.

Las técnicas naturales de humedales artificiales son tratamientos muy recientes, que están en continuo crecimiento y mejora. Son procesos que no están restringidos a los límites de tratamientos secundarios que tienen los humedales naturales. Uno de los puntos por los que estos tratamientos se han visto incrementados su utilización, es gracias al cambio conceptual que se tenía de ellos como aprovechamiento del agua como un recurso útil (aportando esta nutrientes y agua), en vez de ser como una obligación única de depuración. (José, 2013)

La inmensa mayoría de estos contaminantes emergentes son de origen orgánico y serían eliminados de una manera idónea a través de estos sistemas, como puede ser a través de las raíces de las plantas.

La aireación del suelo y ralentización del agua y sedimentación de sólidos a consecuencia de las raíces, junto con un aumento de la superficie para la formación de una biopelícula más la vegetación, hace que se origine un



gradiente de luz y abrigo que hace que el humedal pueda funcionar a temperaturas negativas, incluso de  $-40^{\circ}\text{C}$ . (Kadlec et al, 2000).

La mayoría de los tratamientos convencionales no están diseñados para eliminar PPCP (Productos de Higiene Personal), pero los humedales artificiales son capaces de eliminar algunos de ellos, aunque los mecanismos no se conocen del todo. Y esto es debido a los diversos microambientes que se pueden dar dentro de un humedal y que originan diversas rutas metabólicas que degraden los PPCP y los medicamentos.

Estudios realizados en la universidad de León (María Hijosa-Valsero et al ,2010) con experimentos de humedales a escala laboratorio con  $0,5\text{ m}^3$ , al aire libre, con diferentes configuraciones y durante 9 meses, arrojaron resultados de eliminación de PPCP. (Roig, 2012)

Las diferencias entre humedales utilizados por María Hijosa, radicaban especialmente entre:

- Especies utilizadas  $\rightarrow$  *Typha angustifolia* VS *Phragmites australis*
- Configuración del caudal  $\rightarrow$  superficial u subsuperficial
- Presencia o ausencia de grava
- Tiempo de retención hidráulico  $\rightarrow$  2-3 días

El humedal fue alimentado con el mismo caudal.

A continuación, se verá qué configuraciones son más adecuadas para algunos tipos de C.E según los resultados obtenidos en el estudio de María Hijosa, 2010.

Los antiinflamatorios y analgésicos basados en ketoprofeno, tuvieron eficiencias de eliminación del 11-50% en ambos humedales, con o sin lecho y con macrófitas. Se obtuvo en época invernal, por lo que se puede creer que esta eliminación está basada en la fotocatalisis solar.

El naxoprofeno se eliminó de forma eficaz en los de flujo subsuperficial, siendo en invierno del 27-66% y del 27-83% en verano.



El ibuprofeno se eliminó de forma eficaz en los HA superficiales, sin lecho, con macrófitos flotantes donde las eficacias de eliminación fueron del 25-74 en invierno y del 6-96% en verano.

Estos dos compuestos varían su eliminación en función de la profundidad y del lecho de grava utilizados, así como del flujo (Matamoros, 2009). Las tasas de eliminación más altas, entre 65-96%, fueron obtenidas a través de humedales híbridos conectados en serie (María hijosa-Valsero et al ,2010).

El ácido salicílico es fácilmente degradable por cualquier humedal utilizado y las eficacias de eliminación que tuvo son del 35-85% en invierno y del 84-89% en verano.

Las drogas estimulantes también presentaban facilidad de eliminación por cualquier tipo de HA y los rendimientos de eliminación obtenidos fueron del 23-58% en invierno y del 82-99% en verano. (María hijosa-Valsero et al ,2010) (Matamoros, 2009).

Como conclusión, los HA utilizados presentan altas tasas de eliminación de estos contaminantes, parecidas a las obtenidas en tratamientos convencionales.

Entre los diseños se destaca la eliminación de ketoprofeno, ibuprofeno y carbamazepina a través de los HA de flujo superficial en lámina libre y la eliminación de ketoprofeno y ácido salicílico a través de los HA subsuperficiales.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## 7. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

Las tecnologías blandas que se compararán son un filtro verde y un humedal. Una vez hecho los cálculos y comparadas, se elegirá una de ellas para su implantación de forma ficticia en la zona de Huerta (Salamanca).

Se hará una introducción de cómo se estructuraría cada sistema y de las bases de diseño a seguir, específicas de cada caso. En todas ellas se necesitará realizar un pretratamiento previo de desbaste.

La población y las características del agua residual que se consideran para el estudio son las que se recogen en la siguiente tabla (Tabla 16):

DATOS	VERTIDO BRUTO	LÍMITES VERTIDO*	UNIDAD DE MEDIDA	% REDUCCIÓN
<b>Población</b>	1500		habitantes	
<b>Gasto de agua por persona al día</b>	144		l/día*persona	
<b>Caudal</b>	216.000		l/d	
<b>Caudal</b>	216		m <sup>3</sup> /d	
<b>Caudal</b>	9		m <sup>3</sup> /h	
<b>Caudal</b>	2,5*10 <sup>-3</sup>		m <sup>3</sup> /s	
<b>Temperatura AR</b>	10		°C	
<b>DQO</b>	500	125	mg O <sub>2</sub> /L	75
<b>DBO<sub>5</sub></b>	250	25	mg O <sub>2</sub> /L	90
<b>SS</b>	350	60	mg/L	70
<b>NITRÓGENO TOTAL</b>	50	10-15	mg/L	70-80
<b>FÓSFORO TOTAL</b>	10	1-2	mg/L	80

Tabla 16: Características del agua a tratar en el caso práctico

\*Requisitos exigibles a las aguas residuales urbanas de acuerdo con el Anexo I del Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales. La eliminación de N y P se exige para vertidos en zonas sensibles.

Tanto en humedales como en el filtro verde, se hará un pretratamiento consistente en un desbaste con una reja gruesa y fina, para eliminar sólidos gruesos y finos y un tanque Imhoff, donde se eliminan sólidos sedimentables, con un dimensionamiento común, por tanto, se calcularán previamente y serán los mismo para ambos. Antes de ellos se tendrá un tanque de homogeneización.



### 7.1. DESBASTE

Primeramente, se calculará el desbaste para saber el número necesario de barrotes y el área útil del canal. A continuación, se realizarán los cálculos necesarios para ver la eliminación de cada parte. Se necesitarán una reja de gruesos y una de finos (Tabla 17).

REJA	Espesor mínimo de barrotes	Luz entre barrotes	Accionamiento
<b>Gruesa</b>	> 12 mm	< 60 mm	Mecánico temporizado y por diferencia de nivel
<b>Fina</b>	> 6mm	< 12 mm	Mecánico temporizado y por diferencia de nivel

Tabla 17: Espesor y Luz entre barrotes de Rejas de Finos y Gruesos. Fuente: Lopez.B, 2017

Para la reja de gruesos:

Se pondrá una reja gruesa con un espesor mínimo de barrotes > 14mm y luz entre ellos de < 60 mm. (tabla 17)

La velocidad mínima del agua en el canal será de 0,8 m/s, la velocidad de paso a Q med y colmatación 30% < 1m/s, la velocidad de paso a Q máx. y colmatación del 30% < 1,4 m/s. El sistema de evacuación que se utilizará será a través de contenedores. (Lopez.B.,2016)

La velocidad efectiva de paso(V)(m/s):

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

Donde:

Q: caudal de paso (m<sup>3</sup>/s) = 2,5 \* 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/seg

S: sección del campo de reja (m<sup>2</sup>) =0,1m<sup>2</sup>

V: velocidad efectiva de paso (m/s)

E: distancia entre barrotes= 60 mm

e: espesor de barrotes= 14 mm

C: coeficiente de atascamiento= 0,7



$$V = \frac{2,5 * 10^{-3} m^3}{seg} * \frac{(60 + 14) mm}{60 mm} * \frac{1}{0,7} = \frac{0,044 m}{seg}$$

El área útil del canal en la zona de la reja (m<sup>2</sup>) (AR):

$$AR = Bc * \frac{L}{L + b} * \left(1 - \frac{G}{100}\right)$$

Bc: Ancho del canal (m)= 0,5m

L: Luz o paso entre barrotes (m)=0,06m

b: ancho de los barrotes(m): 0,014m

G: Grado de colmatación=30%

$$AR = 0,5 m * \frac{0,06 m}{(0,06 + 0,014) m} * \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 0,29 m^2$$

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

$$P = Q * \frac{b + L}{\left(1 - \frac{G}{100}\right) * Vp * L * Bc}$$

Q: Caudal de agua (m<sup>3</sup>/s)

Vp: Velocidad de paso de la reja (m/s) =0,044 m/s

$$P = 2,5 * 10^{-3} \frac{m^3}{s} * \frac{14 mm + 60 mm}{\left(1 - \frac{30}{100}\right) * \frac{0,044 m}{s} * 60 mm * 0,5 m} = 2 * 10^{-4} m$$

La pérdida de carga (AH)(m)(Metcalf y Eddy, 2002)

$$AH = 1,143 * \frac{V^2 - v^2}{2 * g}$$

Donde:

g: Gravedad: 9,8 m/s<sup>2</sup>

V: velocidad efectiva de paso (m/s)

v: velocidad aguas arriba de la reja= V\*E

Ef: eficiencia, entre 0,6-0,85: 0,75

$$AH = 1,143 * \frac{0,044^2 - 0,033^2 (m/s)^2}{2 * 9,8 m/s^2} = 2,2 * 10^{-3} m$$



El número de barrotes (N):

$$N = \frac{Bc - L}{b + L}$$

Bc: Ancho del canal (m)=0,5 m

L: Luz de paso (m)=0,06 m

b: ancho de barrotes (m)=0,014m

$$N = \frac{0,5 m - 0,06m}{0,014m + 0,06m} = 6 \text{ barrotes}$$

Las rejillas de gruesos están dimensionadas a partir de fórmulas para grandes plantas depuradoras, pero viendo los resultados obtenidos, no podrían aplicarse a estos sistemas de tecnologías blandas. Se necesitaría buscar una rejilla comercial de sólidos gruesos que sea acorde al caudal que se tiene.

Para la rejilla de finos:

Se pondrá una rejilla fina con un espesor mínimo de barrotes <5 mm y luz entre ellos de < 10 mm. (tabla 17)

La velocidad mínima del agua en el canal será de 0,8 m/s, la velocidad de paso a Q med y colmatación 30% < 1m/s, la velocidad de paso a Q máx. y colmatación del 30% < 1,4 m/s. El sistema de evacuación que se utilizará será a través de contenedores. (Lopez.B.,2016)

La velocidad efectiva de paso(V)(m/s):

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

Donde:

Q: caudal de paso (m<sup>3</sup>/s) = 2,5 \* 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/seg

S: sección del campo de rejilla (m<sup>2</sup>) =0,1m<sup>2</sup>

V: velocidad efectiva de paso (m/s)

E: distancia entre barrotes= 10 mm

e: espesor de barrotes= 5 mm

C: coeficiente de atascamiento= 0,7

$$V = \frac{2,5 * 10^{-3} m^3}{0,1 m^2 \text{ seg}} * \frac{(10 + 5) mm}{10 mm} * \frac{1}{0,7} = \frac{0,054 m}{seg}$$





El área útil del canal en la zona de la reja (m<sup>2</sup>) (AR):

$$AR = Bc * \frac{L}{L + b} * \left(1 - \frac{G}{100}\right)$$

Bc: Ancho del canal (m)= 0,5m

L: Luz o paso entre barrotes (m)=0,01m

b: ancho de los barrotes(m): 0,005m

G: Grado de colmatación=30%

$$AR = 0,5 \text{ m} * \frac{0,01\text{m}}{(0,01 + 0,005)\text{m}} * \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 0,24 \text{ m}^2$$

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

$$P = Q * \frac{b + L}{\left(1 - \frac{G}{100}\right) * Vp * L * Bc}$$

Q: Caudal de agua (m<sup>3</sup>/s)

Vp: Velocidad de paso de la reja (m/s) =0,044 m/s

$$P = 2,5 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{5\text{mm} + 10\text{mm}}{\left(1 - \frac{30}{100}\right) * \frac{0,054\text{m}}{\text{s}} * 10\text{mm} * 0,5\text{m}} = 3,75 * 10^{-5} \text{m}$$

La pérdida de carga (AH)(m)(Metcalf y Eddy, 2002)

$$AH = 1,143 * \frac{V^2 - v^2}{2 * g}$$

Donde:

g: Gravedad: 9,8 m/s<sup>2</sup>

V: velocidad efectiva de paso (m/s)

v: velocidad aguas arriba de la reja= V\*E

Ef: eficiencia, entre 0,6-0,85: 0,75

$$AH = 1,143 * \frac{0,054^2 - 0,04^2 \text{ (m/s)}^2}{2 * 9,8 \text{ m/s}^2} = 3,2 * 10^{-3} \text{ m}$$

El número de barrotes (N):

$$N = \frac{Bc - L}{b + L}$$

Bc: Ancho del canal (m)=0,5 m



L: Luz de paso (m)=0,06 m

b: ancho de barrotes (m)=0,014m

$$N = \frac{0,5 m - 0,01m}{0,005m + 0,01m} = 33 \text{ barrotes}$$

Las rejas de finos están dimensionadas a partir de fórmulas para grandes plantas depuradoras, pero viendo los resultados obtenidos, no podrían aplicarse a estos sistemas de tecnologías blandas.

Las rejas comerciales que se ha elegido son Rejas Automáticas hidráulicas SI350 (Ilustración 10) de la empresa FB Procédés, cuyas características son las siguientes (Tabla 18):

<b>ANCHO</b>	<b>350</b>	<b>mm</b>
<b>ALTO</b>	2230	mm
<b>DESCARGA</b>	Aguas abajo	
<b>LUZ DE PASO</b>	6-20	mm
<b>CAUDAL</b>	50	m <sup>3</sup> /h

Tabla 18: Características Reja Comercial Finos Procédés. Fuente: Procédés

La velocidad efectiva de paso(V)(m/s):

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

Donde:

Q: caudal de paso (m<sup>3</sup>/s) = 2,5 \* 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/seg

S: sección del campo de reja (m<sup>2</sup>) =0,1m<sup>2</sup>

V: velocidad efectiva de paso (m/s)

E: distancia entre barrotes= 6 mm

e: espesor de barrotes= 14 mm

C: coeficiente de atascamiento= 0,7

$$V = \frac{2,5 * 10^{-3} m^3}{0,1 m^2 \text{ seg}} * \frac{(6 + 14) mm}{6 mm} * \frac{1}{0,7} = \frac{0,12 m}{seg}$$

El modelo elegido de FB Procédés SI 350, es el modelo con menos caudal que tiene la empresa, nuestro caudal es de  $9 \text{ m}^3/\text{h}$ , pero la empresa el modelo más pequeño que tiene es para  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ . (Ilustración 9).

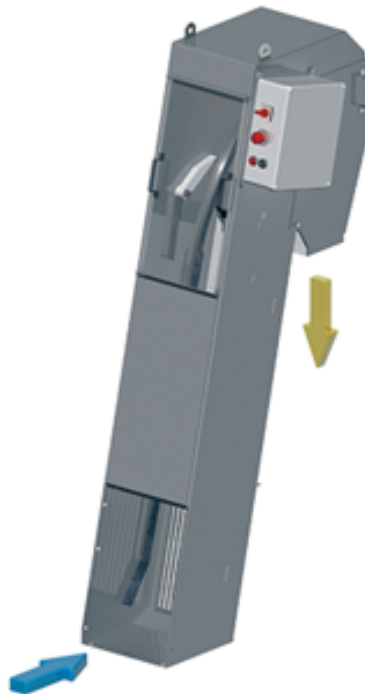


Ilustración 9: Rejas Automáticas SI350. Fuente: [www.estruagua.com](http://www.estruagua.com)



## 7.2. TANQUE IMHOFF

La finalidad del tanque Imhoff es la remoción de los sólidos en suspensión.

Son sistemas ideales para comunidades inferiores a 5000 habitantes, ya que son tanques de doble cámara, por un lado, tienen la sedimentación y por la otra la digestión de los lodos que han sedimentado. (OPS, 2005)

Para su utilización, es obligatorio que las aguas previamente hayan tenido un desbaste.

El tanque Imhoff consta de tres tipos de cámaras:

- Cámara de sedimentación
- Cámara de digestión de lodos
- Área de acumulación de lodos y de ventilación

El funcionamiento del tanque es el siguiente:

- 1.- El agua entra en la cámara de sedimentación donde se remueven los sólidos y gran parte de ellos resbalan por las paredes hacia una cámara que tiene en la parte inferior.
- 2.- Los sólidos que quedan en suspensión son dirigidos hacia la cámara de natas. (OPS, 2005) (Ilustración 10)
- 3.- Los lodos que se acumulan en la parte inferior son extraídos y secados. Todo ello realizado por un gestor autorizado.
- 4.- El biogás generado sale a través del tubo de salida para los lodos. Debido a que se produce poca cantidad, puede expulsarse directamente a la atmosfera sin necesidad de ser quemado.
- 5.- En los tanques Imhoff se produce una reducción del 25-35% de la DBO y del 40-50% de los sólidos suspendidos.

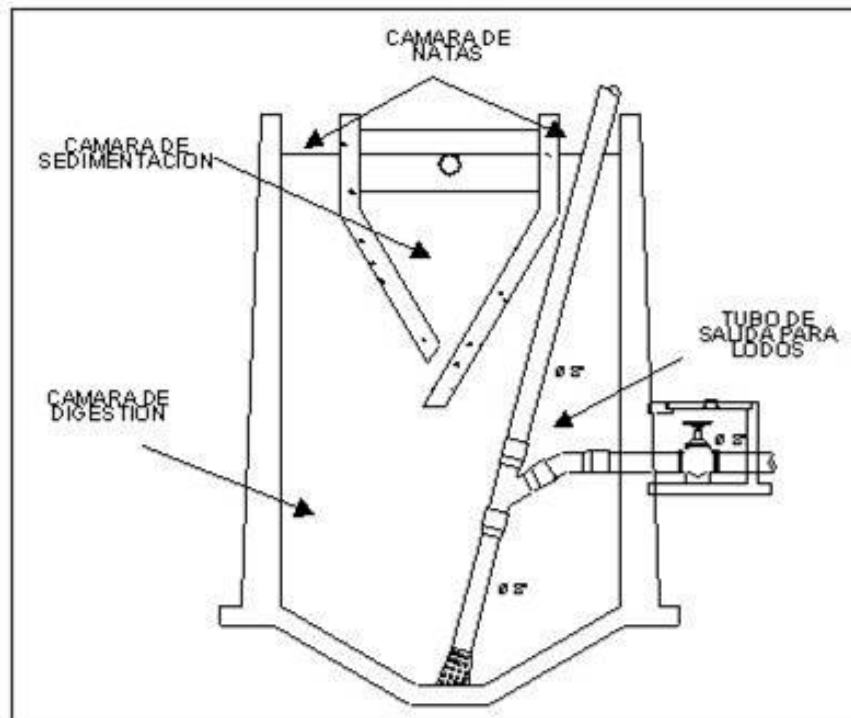


Ilustración 10: Tanque Imhoff

Se dimensionarán los compartimentos, ya que el lecho de secado de lodos se encarga el gestor autorizado. (OPS, 2005)

#### 7.2.1.1.1. Diseño de la cámara de sedimentación

##### Área del sedimentador

$$As = \frac{Qp}{Cs}$$

Donde:

Qp: caudal de diseño: 9 m<sup>3</sup>/h

Cs: Carga superficial: 1m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h)

$$As = \frac{9 \frac{m^3}{h}}{1 \frac{m^3}{(m^2 * h)}} = 9 m^2$$



Volumen del sedimentador ( $V_s$ ) en  $m^3$

$$V_s = Qp * R$$

Donde:

R: periodo de retención hidráulica, entre 1,5 y 2,5 horas: 2 h

$$V_s = 9 \frac{m^3}{h} * 2h = 18 m^3$$

Longitud mínima del vertedero de salida ( $L_v$ ) en m

$$L_v = \frac{Q \max}{Chv}$$

Donde:

Q máx: caudal máximo diario de diseño: 216  $m^3/d$

Chv: Carga hidráulica sobre el vertedero, estará entre 125 a 500  $m^3/(m*d)$ : 250  $m^3/(m*d)$

$$L_v = \frac{216 m^3/d}{250 m^3/(m * d)} = 0,87 m$$

#### 7.2.1.1.2. Diseño de la cámara de digestión

Volumen de almacenamiento y digestión ( $V_d$ ) en  $m^3$

Para su cálculo se tendrá en cuenta la tabla siguiente (tabla 19).

Temperatura °C	Factor de capacidad relativa (fcr)
5	2,0
10	1,4
15	1,0
20	0,7
>25	0,5

Tabla 19: Volumen de almacenamiento y digestión. Fuente: OPS,2005

En nuestro caso será de 10°C, lo que equivale a un factor de capacidad relativa (fcr) de 1,4.

$$V_d = \frac{70 l/hab * P * fcr}{1000 l}$$



Donde:

P: población: 1500 habitantes

Fcr: factor de capacidad relativa (tabla 17)

$$Vd = \frac{70 \text{ l/hab} * 1500 * 1,4}{1000 \text{ l}} = 147 \text{ m}^3$$

Tiempo requerido para la digestión de los lodos (d)

La digestión de los lodos varia con la temperatura, así que tendremos que buscar el valor en la tabla siguiente (tabla 20):

Temperatura °C	Tiempo de digestión en días
5	110
10	76
15	55
20	40
>25	30

Tabla 20: Tiempo requerido para la digestión de los lodos. Fuente: OPS, 2005

En nuestro caso es de 10°C, lo que hace referencia a un valor de 76 días.

7.2.1.1.3. Frecuencia de retiro de los lodos

Se retirarán cada 76 días. Se extraerán mediante tuberías de 200 mm y 15 cm por encima del fondo del tanque.

7.2.1.1.4. Área de ventilación

El área de ventilación seguirá las siguientes directrices:

- 1 m de espacio libre
- 30% de la superficie total para dejarla como superficie libre
- 0,3 cm de borde libre



7.2.1.1.5. Resumen

Parámetro de diseño	Valor	Unidad de medida
<b>DISEÑO LA CÁMARA DE SEDIMENTACIÓN</b>		
Área del sedimentador	9	m <sup>2</sup>
Volumen del sedimentador	18	m <sup>3</sup>
Longitud mínima del vertedero de salida	0,87	m
<b>DISEÑO DE LA CÁMARA DE DIGESTIÓN</b>		
Volumen de almacenamiento y digestión	147	m <sup>3</sup>
Tiempo de digestión de lodos	76	Días
<b>FRECUENCIA DE RETIRADA DE LODOS</b>		
Cada 76 días		
<b>ÁREA DE VENTILACIÓN</b>		
Libre	1	m
Superficie total libre	30	%
Borde libre	0,3	cm
<b>LECHO SECADO DE LODOS</b>		
Gestor autorizado		

Tabla 21: Parámetros de Diseño del Tanque Imhoff

A continuación, se explicarán los dos posibles casos de eliminación: humedales y filtros verdes. Se dimensionarán y se verá cual resulta más adecuado para dicho lugar.





### 7.3. HUMEDALES

Se verán las consideraciones que hay que tomar antes de ser construido y los rendimientos que se obtienen.

#### 7.3.1. Previa construcción

Antes de la construcción de este tipo de filtros, se deberá tener en cuenta una serie de consideraciones como son la impermeabilización, la vegetación y las estructuras de entrada y de salida. Estas consideraciones no serán las mismas para un humedal FWS (FMF) y un SFS (FHS).

Además de lo anteriormente dicho, se deberán también de incluir estaciones de bombeo, desinfección y tuberías de conducción.

A veces se requieren estaciones de oxigenación, pero no es nuestro caso. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

#### 7.3.2. Impermeabilización

Ambos humedales necesitan de la colocación de una barrera impermeable que impida que el contaminante percole y acceda a estratos inferiores de subsuelo o de aguas subterráneas.

El fondo del humedal puede encontrarse con material impermeable natural como pueden ser arcillas o, si no es el caso, se deberá construir de forma artificial, a través de asfalto, capa de bentónica o algún tipo de membrana que impida el paso. Antes de instalarlo, se debe alisar el terreno, sobre todo si se va a poner una membrana, para no dañarla.

El siguiente paso es la retirada y guardado del suelo natural que en él se encuentra, debido a que posteriormente será utilizado en los FWS (FMF).

El sistema en el que se trabaja deberá de tener una ligera pendiente, para favorecer el drenaje y el flujo del sistema, proporcionando unas condiciones hidráulicas idóneas.

Un problema grave se encuentra en la etapa de construcción, en el tránsito de maquinaria pesada, especialmente camiones, que originan roderas, dando lugar a flujos preferenciales permanentes. La forma de solucionarlo es evitando el tránsito de maquinaria que pueda originarlo en las épocas húmedas.



Encima de la membrana impermeabilizante se coloca, en el caso de los SFS (FHS), directamente el medio granular, ya que la membrana debería de poder soportar el peso de este. Es fundamental una elección adecuada del medio granular que en el queramos implantar. Un medio muy fino originará atascamientos, por lo que se elegirá un medio con un grano más grueso, como pueden ser piedras lavadas o grava.

En el caso del medio FWS se coloca directamente el sustrato natural que habíamos retirado previamente y que se había almacenado. Este sustrato servirá como base para la vegetación que se instalará.

Los diques y bermas que se construyan serán similares a los de las lagunas. En los de gran escala, se deberá construir un dique de mayor amplitud y la celda deberá de tener una rampa que permita el acceso para los camiones de mantenimiento. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

### 7.3.3. Vegetación

Preferiblemente se pondrán plantas locales. Lo más aconsejable es plantar, en un lecho previamente preparado, a través de trasplante de rizomas. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002).

Las plantas que mayoritariamente se encuentran en los humedales incluyen carrizos, juncos o espadañas. Al diseñar un sistema natural de eliminación de contaminantes de aguas residuales a partir de humedales, a parte del tratamiento de agua que se consigue, también se logrará crear un hábitat donde pervivan, proporcionando alimento y refugio, a varias especies de aves y diversas formas de vida acuática.

Si el contaminante quedara retenido en la planta, estas se extraerían y se sustituirían por otras nuevas. Las plantas extraídas se llevarían a un gestor autorizado que procedería a su eliminación mediante incineración. El tiempo vegetativo de crecimiento es mucho inferior, económico y sencillo que el que necesitaría un árbol, por eso se prefiere la implantación de un humedal.

A continuación, se especificarán de las 3 especies de plantas más comunes que se utilizan en los humedales artificiales. Estas especies son *Typha*, *Scirpus* y *Phragmites*.

### 7.3.3.1. *Typha*

*Typha* o comúnmente denominada Espadaña, es una planta que se encuentra en todas partes, fuerte, de fácil propagación y de fácil crecimiento en diversas condiciones medioambientales. La producción de biomasa anual es alta. (Ilustración 11).

Una plantación adecuada de 0,6 m de separación, puede originar una cubierta densa en menos de un año.

Los inconvenientes son su baja eliminación de N y P, que se elimina mediante podas y cosechas; y que no son recomendables para sistemas SFS, debido a que tienen una baja penetración en grava, alrededor de 0,3m.



Ilustración 11: *Typha* spp. Fuente: Kerry Dressier, 1996

### 7.3.3.2. *Scirpus spp*

*Scirpus spp* o comúnmente llamados juncos, son plantas de la familia de las cipéraceas, perennes y de crecimiento grupal. Son plantas que crecen en cualquier parte, crecen en un amplio rango de aguas, tanto interiores, pantanos, salobres o humedales. (Ilustración 12).

Los crecimientos desde la profundidad son amplios, desde 5 cm a 3 m y las temperaturas para un crecimiento idóneo van desde los 16 a los 27°C. El pH de crecimiento va de 4 a 9.

El crecimiento es moderado, llegando a tener una buena cobertura en un año si la separación entre ellos es de 0,3 m aproximadamente.

Una gran ventaja de este tipo de especie es que penetra bien en gravas, aprox. 0,6m, por lo que es idóneo para humedales SFS.

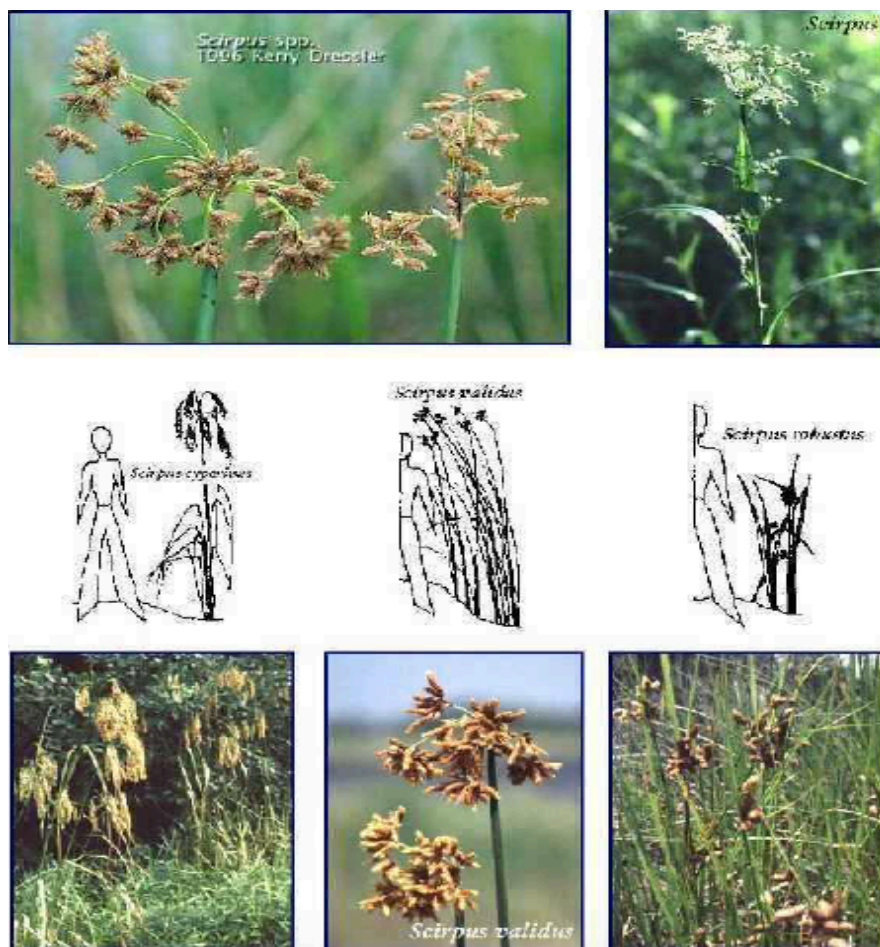


Ilustración 12: *Scirpus spp*. Fuente: Kerry Dressier, 1996

### 7.3.3.3. *Phragmites australis*

*Phragmites australis* o comúnmente denominado carrizo. Son especies acuáticas anuales y de gran altura, con rizomas perennes extensos. Son las especies más usadas en Europa y tienen un excelente cubrimiento anual con una separación aprox. de 0,6 m. (Ilustración 13).

La ventaja de esta especie es la transferencia eficaz del oxígeno, ya que los rizomas tienen una gran penetración vertical y profunda. Esta penetración es mayor que las espadañas, pero inferior que, en los juncos, de 0,4 m aprox.

Son los más usados en los humedales artificiales debido a que otra ventaja que tienen es que no tienen mucho valor alimenticio, por tanto, no son atacadas por animales, como si pudiera ocurrirnos con otro tipo de plantas.



Ilustración 13: *Phragmites australis*. Fuente: Slichter, 2013

A continuación, se muestra una tabla con las especies emergentes más comunes en los humedales de depuración de aguas residuales (Tabla 22).

Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura, ° C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i>	-	14-32		20	5-7.5
	<i>Eleocharis sp.</i>	-	18-27			4-9
	<i>Scirpus lacustris L. (*)</i>	Junco de laguna				
Gramíneas	<i>Glyceria fluitans (L.) R. Br.</i>	Hierba del maná	12-23	10-30	45	2-8
	<i>Phragmites australis (Cav) Trin. ex Steudel (*)</i>	Carrizo				
Iridáceas	<i>Iris pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina				
Juncáceas	<i>Juncus sp.</i>	Juncos	16-26		20	5-7.5
Tifáceas	<i>Thypha sp (*)</i>	Eneas, aneas, espadañas.	10-30	12-24	30	4-10

Tabla 22: Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales. Fuente: García et al, 1997



#### 7.3.4. Microorganismos

La principal función de los microorganismos y su metabolismo es la de regular el humedal. Estarán formados en su mayoría por bacterias, levaduras, hongos y protozoarios.

Esta biomasa microbiana consume la gran mayoría del carbono orgánico y nutrientes.

Las principales funciones de la actividad microbiana son:

- Transformación de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles
- Afectar a la capacidad del proceso del humedal a través de la alteración de las condiciones redox de este
- Reciclaje de nutrientes

Hay tres tipos de transformaciones microbianas. Por un lado, las aerobias o con requerimiento de oxígeno, por otro lado, las anaerobias o en ausencia de oxígeno y por último las facultativas, que, según las condiciones medioambientales, actuarán como anaerobias o aerobias.

Las poblaciones de microorganismos encontradas en las aguas, si las condiciones son las adecuadas, se adaptan a las características de esta, pero, si no son las adecuadas, permanecerán inactivos.

En nuestro caso, las condiciones inadecuadas que se podrán encontrar en un humedal serán la introducción en este de pesticidas y metales pesados, pudiendo entrar en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

#### 7.3.5. Animales

La creación de un humedal dará lugar a la instalación en este de múltiple diversidad de vertebrados e invertebrados.

Los invertebrados ayudarán al proceso de tratamiento descomponiendo materia orgánica.

Los invertebrados son los que más ayudarán al papel ecológico, pero también hay vertebrados como anfibios, tortugas, pájaros y mamíferos.



### 7.3.6. Bases de diseño

En las bases de diseño se calculará el área transversal que necesitará el humedal, la longitud y anchura de este. Se comprobará si los tiempos de retención, carga orgánica y carga hidráulica están dentro de los valores normales de operación de este tipo de sistemas.

#### 7.3.6.1. Humedal

Los humedales artificiales se comportan como reactores biológicos con una cinética de primer orden de flujo pistón. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002).

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-Krt}$$

Donde:

Ce: Concentración de contaminante en el efluente (mg/l)

Co: Concentración del contaminante en el influente (mg/l)

Kr: Constante de reacción de primer orden dependiente de la T<sup>a</sup> (d<sup>-1</sup>)

T: tiempo de retención hidráulico (d)

La constante de reacción Kt:

$$Kt = Kr * \theta_r^{T_w - T_r}$$

Donde:

Kr: constante de reacción a la temperatura de referencia (d) (Tabla 23): 1,104

$\theta_R$ : coeficiente de temperatura (adimensional) (Tabla 23): 1,06

T<sub>w</sub>: temperatura del agua considerada en el diseño: 10°C

T<sub>r</sub>: temperatura de referencia: 20°C

CONTAMINANTE A ELIMINAR	DBO <sub>5</sub>	
Humedales Artificiales de flujo Subsuperficial Horizontal	Kr (d <sup>-1</sup> )	1,104
	$\theta_R$	1,06

Tabla 23: Valores de Kr y de Or para la DBO5. Fuente: Metclaf & Eddy, 2002

$$Kt = 1,104 * 1,06^{10-20} = 0,62$$





Combinando las ecuaciones anteriores, se sacará el área superficial que requerirá nuestro humedal. (García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

$$As = L * W = \frac{Q * \ln (Ce/Cs)}{Kt * y * n}$$

Donde:

As: Área superficial del humedal, m<sup>2</sup>.

Kt: dependerá del contaminante que se quiera eliminar y de la temperatura.

(García et al, 1997; Metcalf & Eddy, 2002)

Ce: DBO<sub>5</sub> de entrada (Kg/m<sup>3</sup>): 0,175 Kg/m<sup>3</sup>

Cs: DBO<sub>5</sub> de salida (Kg/m<sup>3</sup>): 0,00875 Kg/m<sup>3</sup>

h: Profundidad de la celda del humedal (m): 0,4m

n: porosidad o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal:  
0,4

$$As = L * W = \frac{216 \frac{m^3}{d} * \ln(0,175/0,00875)}{0,62 * 0,4m * 0,4} = 6560,34 m^2$$

El área transversal (At)(m<sup>2</sup>)

$$At = \frac{Q}{Ks * s}$$

Donde:

Ks: Conductividad hidráulica del medio filtrante en una sección perpendicular al flujo (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d): En nuestro caso es Arena-Grava (Tabla 24): 750

s: pendiente del fondo del humedal (m/m), donde el valor suele ser de 0,01 (1%):0,01

At: sección del Humedal Artificial perpendicular a la dirección de flujo (m<sup>2</sup>)

TIPO DE MEDIO	TAMAÑO EFECTIVO $d_{10}$ (mm)	Conductividad Hidráulica (m/d)
Arena Gruesa	2	100-1.000
Arena- Grava	8	500-5.000
Grava Fina	16	1.000-10.000

Tabla 24: Valores de la Conductividad hidráulica para distintos tipos de sustratos. Fuente: Reed et al, 1995

$$At = \frac{216}{750 * 0,01} = 28,8 \text{ m}^2$$

La anchura del humedal (m):

$$W = \frac{28,8 \text{ m}^2}{0,4 \text{ m}} = 72 \text{ m}$$

Donde:

W: anchura del humedal (m)

h: profundidad del humedal (m):0,4

La longitud del humedal (m):

$$L = \frac{As}{W} = \frac{6560,34}{72} = 91,12 \text{ m}$$

El tiempo de retención hidráulica se calculará a través de la siguiente ecuación

$$t = \frac{L * W * h * n}{Q}$$

Donde:

L: Largo de la celda del humedal (m)

W: Ancho de la celda del humedal (m)

Como  $As = L * W = 6561 \text{ m}^2$

$$t = \frac{6560,34 \text{ m}^2 * 0,4 \text{ m} * 0,4}{216 \text{ m}^3/\text{d}} = 4,86 \text{ días}$$



La porosidad vendrá dada por la vegetación y los residuos en los humedales FWS y por el medio, las raíces y otro tipo de sólidos en el SFS. Los valores anteriores han sido fijados.

El tiempo hidráulico de residencia entra dentro de los parámetros de diseño (4-15 días).

La carga orgánica (Kg DQO/ha\*d):

$$CO = \frac{Q * Ce}{S} = \frac{216 \frac{m^3}{d} * 0,175 \text{ Kg/m}^3}{0,66 \text{ hec}} = 57,62 \text{ Kg} \frac{DQO}{\text{hec} * \text{día}}$$

La carga orgánica debe de ser menor de 67, el valor obtenido es de 57,62, por tanto, está dentro de los valores normales. (Tabla 25).

Carga Hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d):

$$Ch = \frac{Q}{S} = \frac{216 \text{ m}^3/d}{6560,34 \text{ m}^2} = 0,033 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} * d$$

La carga hidráulica debe de estar entre 0,014-0,046, el valor obtenido es de 0,033, por tanto, está dentro de los valores normales. (Tabla 25).

PARÁMETROS	VALOR
Tiempo de residencia hidráulico (d)	4-15
Profundidad del agua (m)	0,1-0,4
Carga orgánica (Kg DBO <sub>5</sub> /ha*d)	<67
Carga Hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)	0,014-0,046

Tabla 25: Parámetros de diseño de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial. Fuente: Metclaf & Eddy, 2002

Teniendo en cuenta que una hectárea son 10.000 m<sup>2</sup>, se necesitará 0,66 hectáreas de terreno (Tabla 26).

PARÁMETRO DE DISEÑO	VALOR
Tiempo retención hidráulico (d)	4,86
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	216
Área superficie Humedal (m <sup>2</sup> )	6560,34
Área superficie Humedal (ha)	0,66
Área Transversal (m <sup>2</sup> )	28,8
Temperatura de la zona (°C)	10
Longitud (m)	91,12
Anchura (m)	72
Carga Orgánica (Kg DBO <sub>5</sub> /ha*d)	57,62
Carga Hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)	0,033

Tabla 26: Valores Obtenidos del dimensionamiento del Humedal

### 7.3.7. Esquema del proceso

El esquema que se seguirá en el proceso será el siguiente (Ilustración 14):

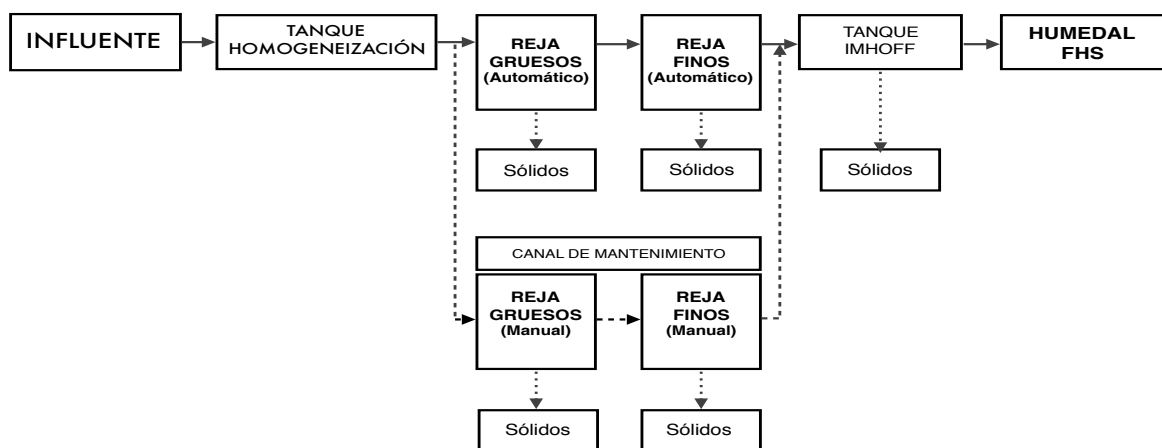


Ilustración 14: Esquema de un proceso con humedal artificial FHS



Para finalizar, se calculará como quedaría el agua que sale del Humedal.

El esquema del humedal sería el anteriormente expuesto, formado por un desbaste para eliminar solidos finos/gruesos y un tanque Imhoff. Tras este pretratamiento de desbaste y tanque Imhoff, se sigue con un humedal FHS, para posteriormente verter al río.

Los parámetros de eliminación son los siguientes (Tabla 27):

	% REDUCCIÓN DESBASTE	% REDUCCIÓN TANQUE IMHOFF	% REDUCCION FHF
<b>DBO</b>	0	30	95
<b>DQO</b>	0	30	95
<b>SS</b>	15	45	85
<b>P</b>	0	0	43
<b>N</b>	0	0	50

Tabla 27: Parámetros de Reducción típicos del Sistema de Humedal elegido.

### 7.3.8. Resultado del Humedal

DATOS ENTRADA			
Q (L/d)	216000		
Q (m3/d)	216		
DQO (mg/L)	500	0,5	Kg/m3
DBO (mg/L)	250	0,25	Kg/m3
SST (mg/L)	350	0,35	Kg/m3
N (mg/L)	50	0,05	Kg/m3
P (mg/L)	10	0,01	Kg/m3
densidad del agua (1000 kg/m3)	1000		

Tabla 28: Características de Entrada del Caudal del agua Residual elegida.

LÍMITES DE VERTIDO			
DQO (mg/L)	125	0,125	Kg/m3
DBO (mg/L)	25	0,25	Kg/m3
SST (mg/L)	60	0,06	Kg/m3
N (mg/L)	15	0,15	Kg/m3
P (mg/L)	2	0,02	Kg/m3

Tabla 29: Límites de Vertido de Agua residual. Fuente: Mapama

	INFLUENTE	DESBASTE	TANQUE IMHOFF	HUMEDAL FHS	SALIDA
Q (m3/d)	216	216	216	216	216
DQO (Kg/m3)	0,5	0,5	0,35	0,0175	0,018
DBO (Kg/m3)	0,25	0,25	0,175	0,00875	0,00875
SST (Kg/m3)	0,35	0,2975	0,163625	0,02454375	0,02
N (Kg/m3)	0,05	0,05	0,05	0,0285	0,0285
P (Kg/m3)	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005
flujo DQO (Kg/d)	108	108	75,6	3,78	3,78
flujo DBO (Kg/d)	54	54	37,8	1,89	1,89
flujo SST (Kg/d)	75,6	64,26	35,343	5,30145	5,30145
flujo N (Kg/d)	10,8	10,8	10,8	6,156	6,156
flujo P (Kg/d)	2,16	2,16	2,16	1,08	1,08
flujo DQO + SST+N+P (Kg/d)	250,56	239,22	161,703	18,20745	18,20745
flujo H2O	215749,44	215760,78	215838,297	215981,7926	215981,7926
flujo Total	216000	216000	216000	216000	216000

Tabla 30: Resultados del agua de salida del humedal diseñado.

## 7.4. FILTROS VERDES

El influente que se aplicará al filtro verde deberá de ser tratado previamente con un desbaste mediante rejillas y tanque Imhoff, evitándose de esta manera una obstrucción de las tuberías que conduzcan el agua residual a tratar. Para ello, previamente se tendrá un tanque de homogeneización.

Una vez realizado el pretratamiento, se realiza el tratamiento de agua a través de filtros verdes. Para ello se divide el terreno en el que lo vayamos a implantar en parcelas, con riego de forma rotativa mediante surcos. Se necesita realizar un riego en rotación para tener una reoxigenación natural de las parcelas tras el periodo de encharcamiento. La rotación será de 1 riego por 2 parcelas y día. (Fuente.M. et al, 2010) (Ilustración 15)

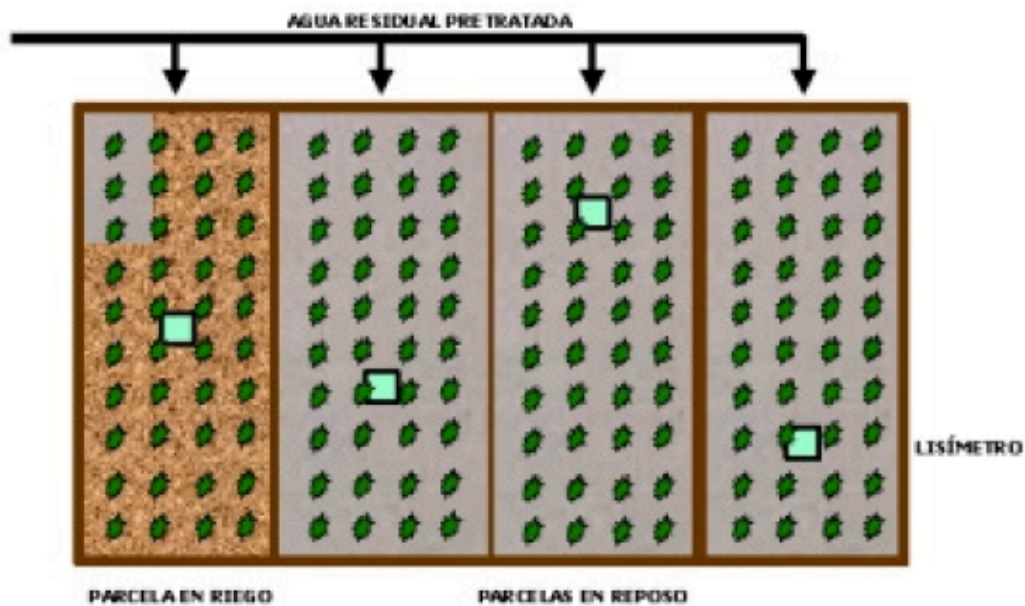


Ilustración 15: Esquema de las diferentes parcelas. Fuente: Fuente.M. et al, 2010.

Las aguas obtenidas tras este proceso no son reutilizables de forma inmediata, si no que se incorporan a acuíferos tras su infiltración en el terreno.

Para controlar la calidad de las aguas, se instala en la parcela una red de lisímetros, que nos permite recoger muestras de diferentes puntos y profundidades.

### 7.4.1. Esquema del proceso

El esquema que seguirá el proceso será el siguiente (Ilustración 16):

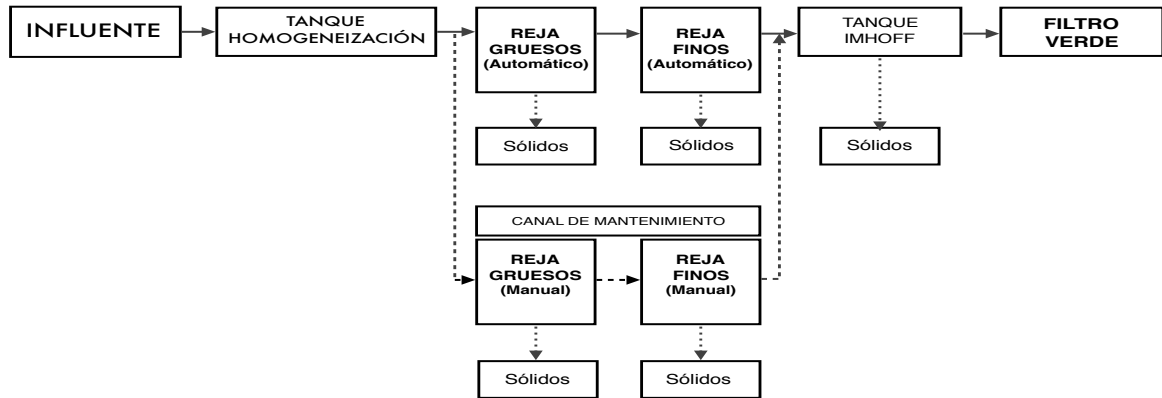


Ilustración 16: Esquema del proceso del filtro verde.

Se tendrá en primer lugar un pretratamiento constituido por un desbaste mediante rejas donde se eliminan sólidos inorgánicos, un tanque Imhoff, para eliminar sólidos gruesos y un lagunaje. Tras ello, mediante bombeo, se pasa el agua hacia el filtro verde, donde terminará de depurarse y tras ello se verterá al río o reutilizarlo para regadío o cualquier otra actividad. Mediante la red de lisímetros se controla que se cumplan los límites de salida.

Cada 5 años se realiza una tala de los árboles y la plantación de otros nuevos. Si estos has eliminado el contaminante a través de su sistema y no están contaminados, pueden utilizarse como recurso maderero. Si el contaminante se quedara retenido dentro del árbol, se llevaría a un gestor autorizado para su posterior eliminación mediante incineración.





#### 7.4.2. Diseño y cálculo de parámetros

La característica principal que se ha de tener en cuenta a la hora de implantar un sistema de depuración de aguas residuales a través de un filtro verde, y que funcione de manera óptima, es lo referido al suelo. Los suelos óptimos para su implantación deben de ser suelos con una permeabilidad media y buena textura, especialmente los franco-arcillosos, por su efectiva filtración.

La especie que implantaremos será Chopos, del genero *Populus*, son arboles caducifolios de 20-30 m de altura, de tronco grueso y grisáceo (Russell.T.; 2012). Esta especie tiene la capacidad de absorber 1 m<sup>3</sup> agua al día y una gran capacidad de resistencia a los contaminantes y a los cambios de temperatura. (Fuente.M. et al, 2010).

El sistema de descontaminación de *Populus* consistirá en la toma del contaminante y su retención dentro del sistema o la expulsión de este, a través de las hojas, a la atmosfera.

La descontaminación se realizará a través de un bombeo orgánico a través de las raíces. (ilustración 21). Al llegar las raíces al nivel freático, forman una gran masa de raíces, con una alta capacidad de absorción de agua. Esta acción de absorción de agua disminuye la penetración de los contaminantes hacia capas más profundas. En zonas agrícolas pueden absorber el excedente de herbicidas y fertilizantes que se dirijan hacia cursos de agua o en vertederos absorben el agua, siendo sustitutos de la capa de arcilla o plástico que se instala.

Más concretamente los procesos que se dan en la planta, de forma general, son los siguientes (ilustración 17):

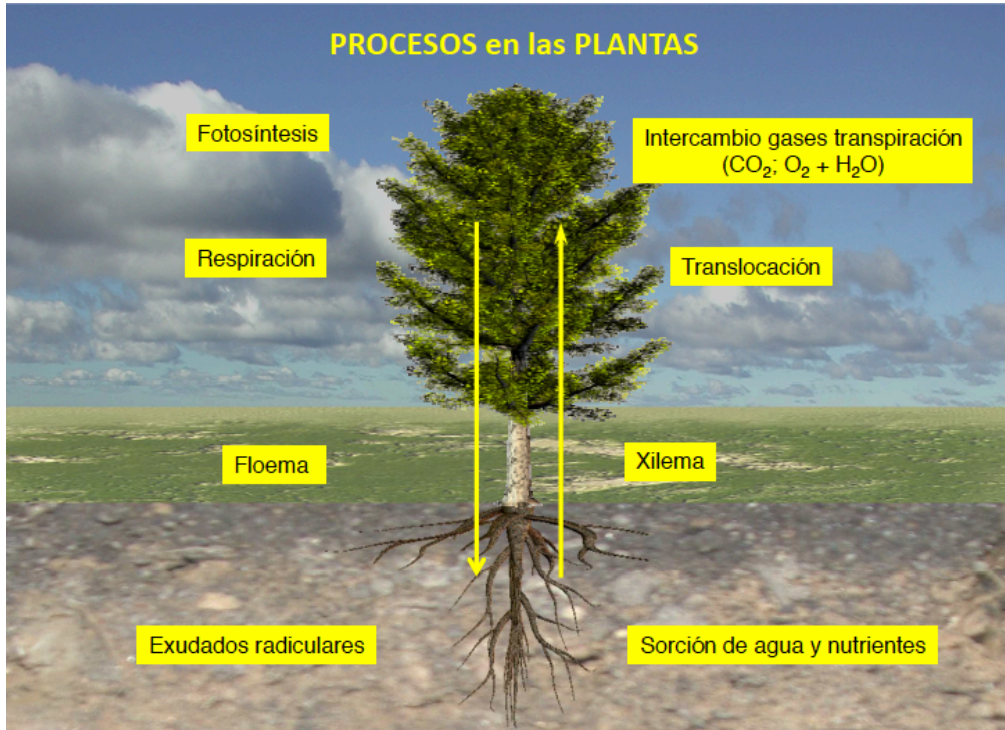


Ilustración 17: Procesos en *Populus*. Fuente: Cortes A., 2015

Las diferentes acciones que se producen en la planta son las siguientes (ilustración 18):

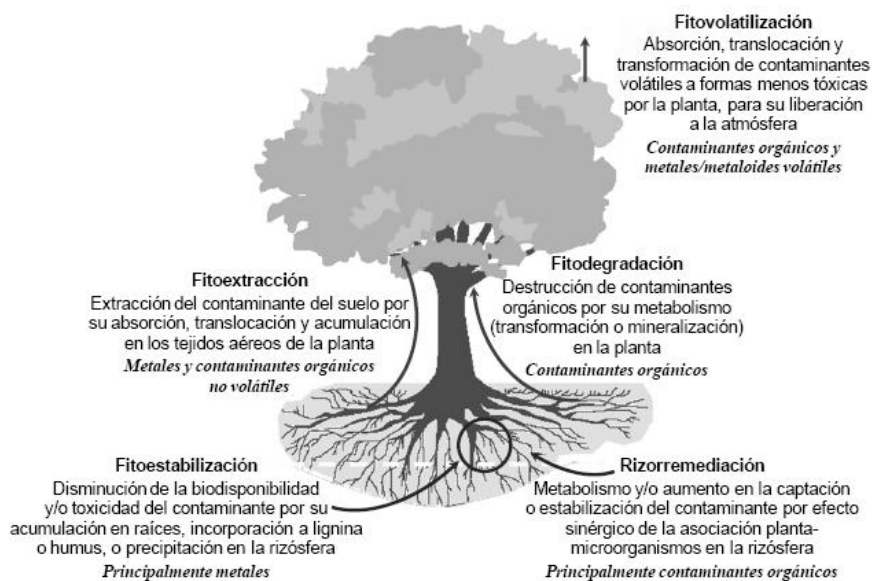


Ilustración 18: Principales estrategias implicadas en la Fitorremediación de *Populus*. Fuente: Cortes A., 2015

El agua residual es regada sobre las plantas y estas obtienen el contaminante del suelo (fitoextracción) y ya con él en las raíces puede realizar diferentes acciones: rizofiltración y rizodegradación acumulándolo en las raíces, fitodegradación eliminándolo en el organismo, fitovolatilización mandándolo a la atmósfera. (Ilustración 18)

Una vez en el organismo, dependiendo de si se tiene un contaminante orgánico o inorgánico, se eliminará de diferente manera.

El contaminante inorgánico queda secuestrado en vacuolas del organismo dentro de él, mientras que el orgánico es degradado enzimáticamente, secuestrado y mediante un transporte activo, eliminado al exterior de la célula. (ilustración 19).

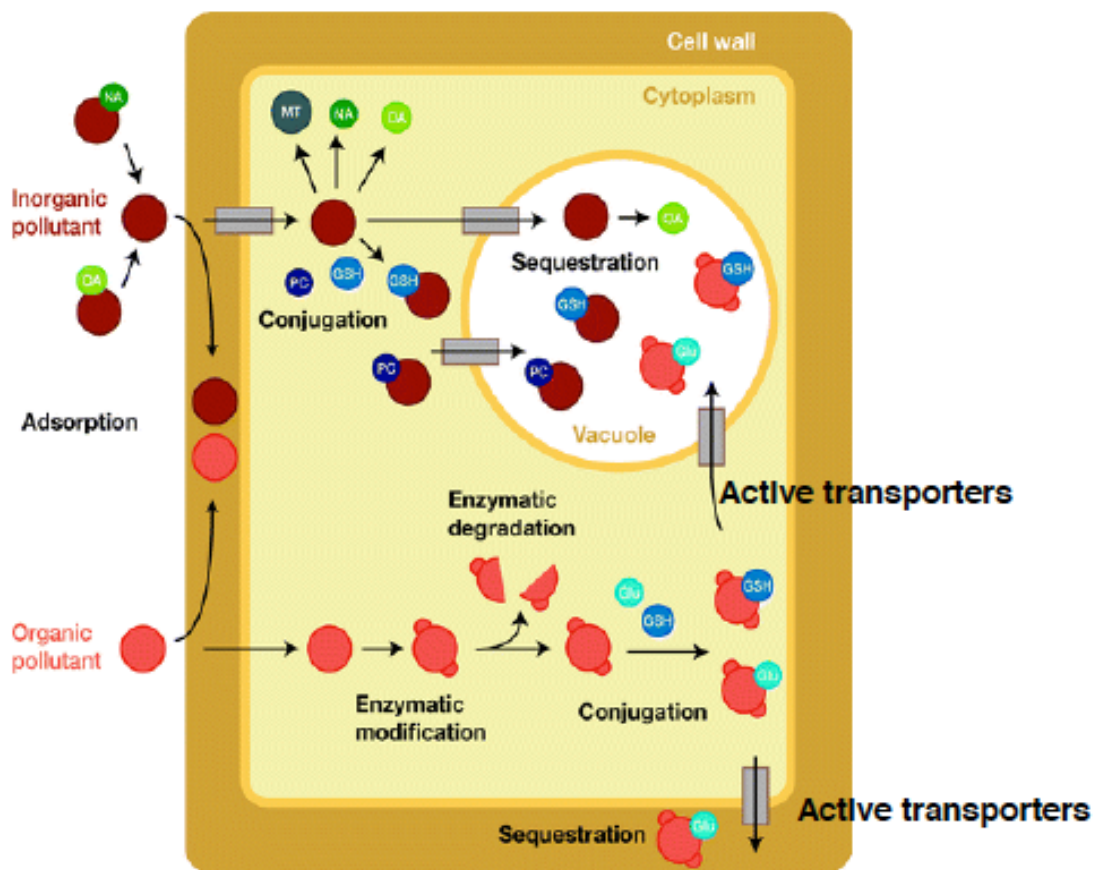


Ilustración 19: La desintoxicación implica la conjugación seguida de secuestro activo en la vacuola, donde el contaminante puede hacer menos daño. Fuente Cortes. A., 2015



A continuación, se calcula el diseño teórico para su implantación.  
Para calcular las necesidades hídricas de la especie, tenemos la expresión siguiente (Sánchez. F.J., 2011):

$$ET_c = ET_o * K_c$$

donde:

ET<sub>c</sub>: evotranspiración del cultivo (mm/día)

ET<sub>o</sub>: evotranspiración de referencia (mm/día)

K<sub>c</sub>: coeficiente del cultivo

La evotranspiración de referencia es un dato dependiente de la climatología de la zona en la que lo queramos implantar y para cada época del año. En este caso Salamanca o Valladolid. Por ejemplo, en Huerta (Salamanca) en Julio sería de 8,43 mm /día.

El ejemplo para Huerta (Salamanca), se obtendría calculando la ET<sub>o</sub> diaria para un día cualquiera del mes de Julio, sabiendo que se encuentra a 40° latitud norte, y que las temperaturas para ese día son:

$$t_{\text{media}} = 24,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{máxima diaria}} = 29,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{mínima diaria}} = 18,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Valor de la Radiación extraterrestre (Tabla, para Agosto y 40° latitud Norte):

$$R_0 = 36,7 \text{ M Julios/m}^2 \text{ /día}$$

Para pasarlo a su equivalente en mm/día:

$$R_0 = 36,7 * 0,408 = 15,0 \text{ mm/día}$$

Finalmente, aplicando la ecuación:

$$ET_0 = 0,0023 (t_{\text{media}} + 17,78) R_0 * (t_{\text{máxima}} - t_{\text{min}})^{0,5}$$

$$ET_0 = 0,0023 (t_{\text{media}} + 17,78) * R_0 * (t_{\text{máxima}} - t_{\text{mínima}})^{0,5}$$

$$ET_0 = 0,0023 (24,2 + 17,78) * 15,0 * (29,8 - 18,3)^{0,5} = 8,33 \text{ mm/día}$$

Las necesidades hídricas de la especie, K<sub>c</sub>, se calcularán a través de las K<sub>c</sub> más desfavorables, es decir, en épocas de insolación y desarrollo de cultivo. En este caso es de 0,8. (Andivia et al, 2013)

Esta K<sub>c</sub> irá variando a lo largo del ciclo vegetativo de *Populus*, siendo pequeña en las primeras etapas y aumentando cuando el árbol va creciendo. En



la floración serán máximos, manteniéndose en la fase media y decreciendo en la etapa de maduración.

También las necesidades hídricas variarán dependiendo en la época del año en la que nos encontremos, siendo mayores en la época seca y menores en la lluviosa. (Fuente.M., et al, 2010)

Por tanto, las necesidades hídricas serán:

$$ET_c = 8,33 * 0,8 = 6,66 \text{ mm/día}$$

$$ET_c = \frac{6,66 \text{ mm}}{\text{día}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 6,66 * \frac{10^{-3} \text{ m}}{\text{d}} * \frac{10.000 \text{ m}^2}{\text{ha}} = \frac{66,6 \text{ m}^3}{\text{ha}} / \text{día}$$

$$ET_c = \frac{\frac{66,6 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{\text{día}} * 365 \text{ d}}{\text{año} * 0,8} = \frac{24.317 \text{ m}^3}{\text{año}}$$

$$Q_{\text{diario}} = 216 \text{ m}^3/\text{día}^*$$

$$Q_{\text{anual}} = 216 \text{ m}^3/\text{día} * 365 = 78.840 \text{ m}^3/\text{anual}$$

Tras los cálculos anteriores, se obtiene la superficie necesaria:

$$\text{Superficie} = \frac{\text{Caudal año}}{ET_c} = \frac{78.840 \text{ m}^3/\text{anual}}{\frac{24.317 \frac{\text{m}^3}{\text{ha}}}{\text{anual}}} = 3,25 \text{ has} = 32.422 \text{ m}^2$$

En resumen:

PARAMETROS DE DISEÑO	VALOR
Caudal anual (m <sup>3</sup> /año)	78.840
Necesidades hídricas (m <sup>3</sup> /ha*año)	24.317
Superficie (Ha)	3,25

Tabla 31: Parámetros de diseño obtenidos del Filtro Verde

En cuanto a la cantidad de árboles que necesita el humedal, si se considera 1 árbol por cada 2 m<sup>3</sup> de humedal, se necesitaran:

$$N^{\circ} \text{ Árboles} = \frac{32.422 \text{ m}^2}{2 \text{ m}^2} = 16.211 \text{ árboles}$$



Para finalizar, se calcula como quedaría el agua que sale del filtro verde.

Los parámetros de eliminación son los siguientes (Tabla 32):

	% REDUCCIÓN DESBASTE	% REDUCCIÓN TANQUE IMHOFF	% REDUCCION F.V.
<b>DBO</b>	0	30	90
<b>DQO</b>	0	30	90
<b>SS</b>	15	45	95
<b>P</b>	0	0	90
<b>N</b>	0	0	90

Tabla 32: Parámetros de eliminación del Filtro Verde

### 7.4.3. Resultados del Filtro Verde

DATOS ENTRADA			
Q (L/d)	216000		
Q (m3/d)	216		
DQO (mg/L)	500	0,5	Kg/m3
DBO (mg/L)	250	0,25	Kg/m3
SST (mg/L)	350	0,35	Kg/m3
N (mg/L)	50	0,05	Kg/m3
P (mg/L)	10	0,01	Kg/m3
densidad del agua (1000 kg/m3)	1000		

Tabla 33: Características de Entrada del Caudal del agua Residual elegida

LÍMITES DE VERTIDO			
DQO (mg/L)	125	0,125	Kg/m3
DBO (mg/L)	25	0,25	
SST (mg/L)	60	0,06	Kg/m3
N (mg/L)	15	0,15	
P (mg/L)	2	0,02	

Tabla 34: Límites de Vertido de Agua residual. Fuente: Mapama

	INFLUENTE	PRETRATAMIENTO	TANQUE IMHOFF	FILTRO VERDE	SALIDA
Q (m3/d)	216	216	216	216	216
DQO (Kg/m3)	0,5	0,5	0,35	0,035	0,035
DBO (Kg/m3)	0,25	0,25	0,175	0,0175	0,0175
SST (Kg/m3)	0,35	0,2975	0,163625	0,01	0,01
N (Kg/m3)	0,05	0,05	0,05	0,005	0,005
P (Kg/m3)	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001
flujo DQO (Kg/d)	108	108	75,6	7,56	7,56
flujo DBO (Kg/d)	54	54	37,8	3,78	3,78
flujo SST (Kg/d)	75,6	64,26	37,8	1,76715	1,76715
flujo N (Kg/d)	10,8	10,8	10,8	1,08	1,08
flujo P (Kg/d)	2,16	2,16	2,16	0,216	0,216
flujo DQO + SST+N+P (Kg/d)	250,56	239,22	164,16	14,40315	14,40315
flujo H2O	215749,44	215760,78	215835,84	215985,5969	215985,5969
flujo Total	216000	216000	216000	216000	216000

Tabla 35: Resultados del agua de salida del Filtro Verde diseñado



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**





## 8. COMPARATIVA DEL ESTUDIO

Con ambos sistemas se cumplen los límites de vertido de manera efectiva y con amplias reducciones respecto de estos.

Además de las múltiples ventajas económicas de ambos métodos, se tiene el impacto paisajístico positivo, restauración de ecosistemas, atracción de vertebrados e invertebrados y nula generación de fangos. Todo ello podría aprovecharse como educador ambiental.

Entre ambos sistemas, se elegirá por la implantación de un humedal, debido a que necesita una menor extensión de terreno, 0,66 hectáreas frente a las 3,25 que necesita el filtro verde, se puede utilizar como tratamiento secundario y terciario, fácil recolección de las plantas acumuladoras de contaminante y fácil reposición de éstas, además de poder originar un ecosistema más amplio.

Otra ventaja de elegir el humedal, es que la actividad vegetativa de las plantas tras plantarse es más rápida (días) que la de los chopos (1-1,5 años).



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## 9. HUMEDAL EN HUERTA (SALAMANCA)

Se ha proyectado una posible ubicación de un humedal artificial en la localidad de Huerta (Salamanca). Esta localidad está ubicada junto al río Tormes. (Ilustración 20 y 22).

Los pueblos de los que se trataría el agua serían de Huerta (305 habitantes), Nuevo Amatos (171 habitantes), Encinas de Abajo (469 habitantes), Nuevo Francos (194 habitantes) y Aldearrubia (129 habitantes).



Ilustración 20: Entrada a la Zona de construcción

### 9.1. DIMENSIONES LUGAR

Las dimensiones del terreno son de 24,12 hectáreas disponibles, de las que se necesitan 0,66 hectáreas para el humedal, dimensionándose el humedal para 2 hectáreas (Ilustración 21).

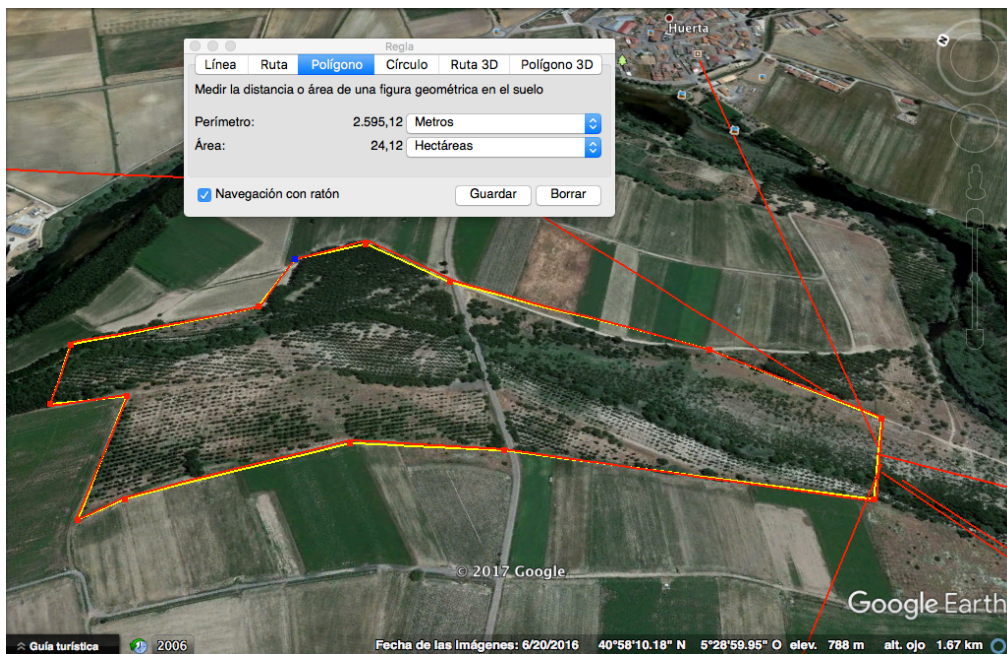


Ilustración 21: Foto Zona del Construcción de la Tecnología Blanda

Las zonas cercanas al río (Ilustración 23 y 24) son zonas choperas separadas por diques de contención, haciendo del lugar, la ubicación ideal para la implantación del humedal, dada, además, la distancia respecto la población más cercana, 0,8 km Huerta, la difícil contaminación de zonas de regadío cercana, debido a los diques ya establecidos y la facilidad de acceso a la zona, a través de la carretera Sta. Marta de Tormes- Huerta.

A continuación, se expondrán una serie de fotos de la zona donde se realizaría el hipotético humedal, así como de la zona donde se vertería el agua depurada.



*Ilustración 22: Interior*



*Ilustración 23: Entrada a Huerta*



*Ilustración 24: Zona de vertido*

## 9.2. COMO SE LLEVARÁ AL LUGAR

El agua se canalizará desde su lugar de procedencia a través de tuberías subterráneas, instalándose una rejilla en el punto de llegada de destino para eliminar grandes sólidos en suspensión.

Las distancias desde los lugares de procedencia hasta el punto de descarga del humedal son las siguientes: Huerta: 0,8 Km, Nuevo Amatos 2,4 km, Aldearrubia 5,2 km y Encinas 3,2 km. (Ilustración 25).

El agua, tras pasar por el tanque de homogeneización, el desbaste con rejas de finos y gruesos, el tanque Imhoff y el humedal FHS y, cumpliendo con los correspondientes límites de vertido, será vertida al río.

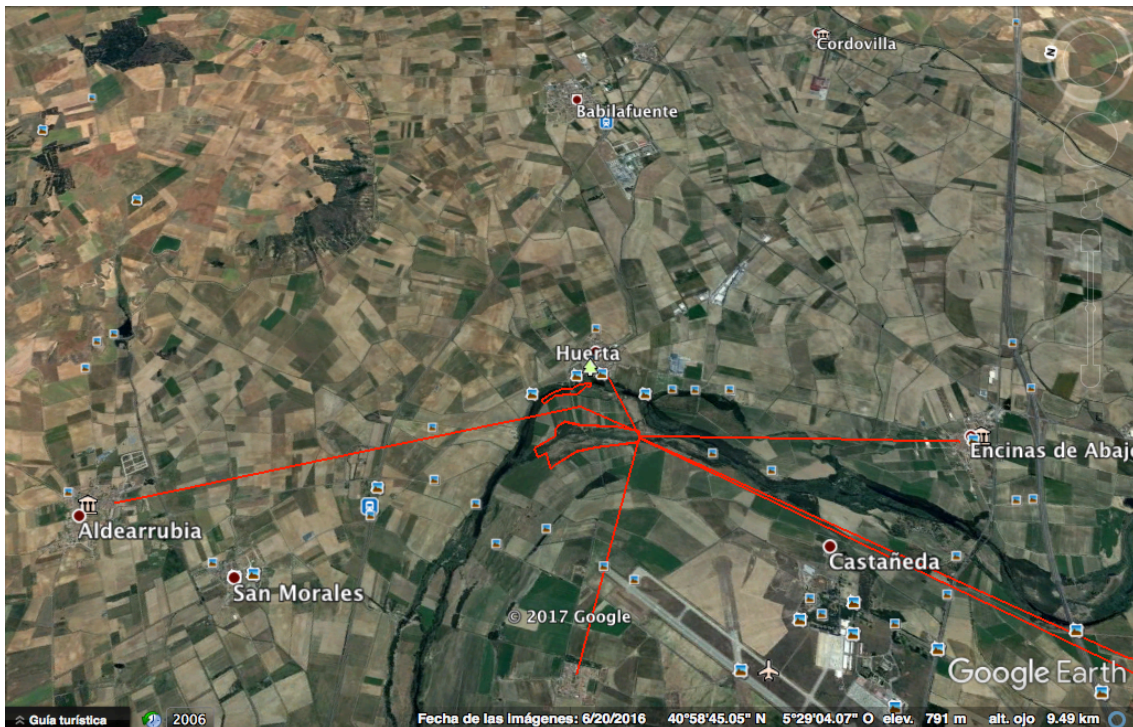


Ilustración 25: Localización de los pueblos.

Una vez elegido el humedal como solución más viable, se verán las estructuras de entrada y salida que debe de tener y el esquema que seguirá el proceso

### 9.3. ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA

Para obtener los rendimientos esperados, se necesitarán flujos uniformes con tuberías de recolección perforadas que pondremos a lo largo de la celda, tanto en la entrada como en la salida.

Los colectores de entrada permitirán igualar los cauces de cada celda y se situara sobre la superficie para poder tener acceso a los ajustes y controles.

Los colectores de salida son tuberías perforadas en el fondo del lecho. Normalmente se colocan en zanjas rellenas de materiales porosos que permitan un correcto drenaje.

### 9.4. ESQUEMA DEL TRATAMIENTO

El esquema del tratamiento consistirá en un tanque de homogeneización, una arqueta de desbaste donde se eliminarán los sólidos gruesos y los finos, seguido de un tanque Imhoff para eliminar solidos sedimentables, para finalizar en un humedal FHS. (Ilustración 26). Tras ello, se verterá al río Tormes o se utilizará el agua para regar las parcelas cercanas.

El canal de rejas se hará por duplicado para mantenimiento y una mayor seguridad. Las rejas que se instalarán serán manuales.

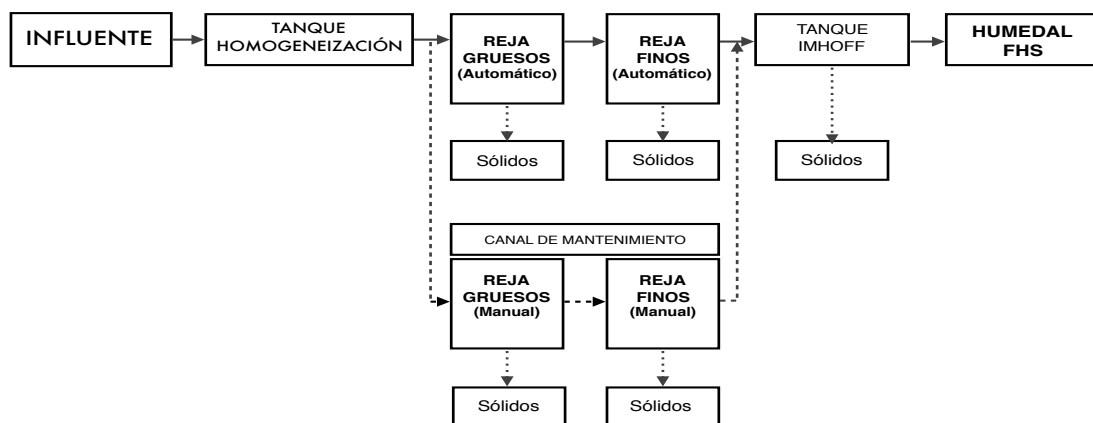


Ilustración 26: Sistema de Humedal Artificial implantado en Huerta



## 9.5. RESULTADOS DE DISEÑO

Las bases de diseño, calculadas en el apartado de comparación de humedal frente al filtro verde, necesarias para nuestro humedal son las siguientes:

### 9.5.1. Desbaste

Las bases de diseño utilizadas para el desbaste son las calculadas anteriormente en el apartado de “desbaste” (tabla 36).

PARÁMETRO DE DISEÑO	VALOR	UNIDADES DE MEDIDA
CAUDAL	9	m <sup>3</sup> /h
ANCHO	350	mm
ALTO	2230	mm
DESCARGA	Aguas abajo	
LUZ DE PASO	6	mm
VELOCIDAD DEL AGUA	0,119	m/s

Tabla 36: Parámetros de diseño del Desbaste Reja de Finos Comercial

Para la reja de gruesos, se buscará en el mercado una reja que se aproxime a los valores que han sido obtenidos teóricamente.



### 9.5.2. Tanque Imhoff

Las bases para el tanque Imhoff han sido calculadas con anterioridad en el Apartado 7.2 de “Tanque Imhoff”. (Tabla 37).

Parámetro de diseño	Valor	Unidad de medida
<b>DISEÑO DEL SEDIMENTADOR</b>		
Área del sedimentador	9	m <sup>2</sup>
Volumen del sedimentador	18	m <sup>3</sup>
Longitud mínima del vertedero de salida	0,87	m
<b>DISEÑO DEL DIGESTOR</b>		
Volumen de almacenamiento y digestión	147	m <sup>3</sup>
Tiempo de digestión de lodos	76	Días
<b>FRECUENCIA DE RETIRADA DE LODOS</b>		
Cada 76 días		
<b>ÁREA DE VENTILACIÓN</b>		
Libre	1	m
Superficie total libre	30	%
Borde libre	0,3	cm
<b>LECHO SECADO DE LODOS</b>		
Gestor autorizado		

Tabla 37: Parámetros de diseño del Tanque Imhoff





### 9.5.3. Humedal

Los parámetros son los calculados anteriormente en el diseño de un humedal (Apartado 7.3.6). (Tabla 38). La vegetación que se pondrá serán juncos, espadas y carrizos. El medio granular será de arena-grava.

PARÁMETRO DE DISEÑO	VALOR
Tiempo retención hidráulico (d)	4,86
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	216
Área superficie Humedal (m <sup>2</sup> )	6560,34
Área superficie Humedal (ha)	0,66
Área Transversal (m <sup>2</sup> )	28,8
Temperatura de la zona (°C)	10
Longitud (m)	91,12
Anchura (m)	72
Carga Orgánica (Kg DBO <sub>5</sub> /ha*d)	57,62
Carga Hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d)	0,033

Tabla 38: Parámetros de diseño del Humedal



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## 10. ANEXOS

Tabla 1: Contaminantes, efectos potenciales y eliminación de forma natural .....7

Tabla 2: Comparación de Tecnologías Intensivas y Extensivas. Fuente: LIFE 11, 2012 .....9

Tabla 3: Ventajas e Inconvenientes de las Tecnologías Blandas. Fuente: LIFE 11, 2012 .....10

Tabla 4: Características del emplazamiento y criterios de selección para los F.V. (Metcalf & Eddy, 2002).....14

Tabla 5: Ventajas e Inconvenientes de los Filtros Verdes. Fuente: LIFE 11, 2012.....15

Tabla 6: Ventajas e Inconvenientes de la Infiltración. Fuente: LIFE 11, 2012 ...17

Tabla 7: Ventajas e Inconvenientes de los Humedales.....24

Tabla 8: Características de los SFS Horizontales y Verticales. Fuente: Medina et al, 2012 .....29

Tabla 9: Parámetros de diseño de los sistemas FMF y FHS. Fuente: Medina et al, 2012 .....30

Tabla 10: procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en SPA: sistemas de plantas acuáticas, HFS: humedales de flujo superficial; HFSS: humedales de flujo subsuperficial; HFV: humedales con flujo vertical. (ARIAS.C., BRIX.H, 2003).....36

Tabla 11.: Características de ubicación de los sistemas de tratamiento naturales. Fuente: Medina Y.F.; 2012 .....41

Tabla 12: Características de los diseños de los diferentes sistemas de tratamiento naturales. Fuente: Medina Y.F.; 2012 .....41

Tabla 13: Comparación en el rendimiento de los diversos sistemas naturales de depuración de aguas residuales urbanas. Fuente: Medina Y.F.; 2012.....42

Tabla 14: Compuestos perfluorados, usos y peligrosidad. Fuente: Roig.J., 2012 .....47

Tabla 15: Tipos de Fármacos y los más utilizados. Fuente: Roig.J., 2012 .....48

Tabla 16: Características del agua a tratar en el caso práctico .....53

Tabla 17: Espesor y Luz entre barrotes de Rejas de Finos y Gruesos. Fuente: Lopez.B, 2017 .....54

Tabla 18: Características Reja Comercial Finos Procedés. Fuente: Procedés .58

Tabla 19: Volumen de almacenamiento y digestión. Fuente: OPS,2005.....62

Tabla 20: Tiempo requerido para la digestión de los lodos. Fuente: OPS, 2005 .....63

Tabla 21: Parámetros de Diseño del Tanque Imhoff .....64

Tabla 22: Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales. Fuente: García et al, 1997 .....70

Tabla 23: Valores de Kr y de Or para la DBO5. Fuente: Metclaf & Eddy, 2002 72

Tabla 24: Valores de la Conductividad hidráulica para distintos tipos de sustratos. Fuente: Reed et al, 1995.....74

Tabla 25: Parámetros de diseño de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial. Fuente: Metclaf & Eddy, 2002.....75

Tabla 26:Valores Obtenidos del dimensionamiento del Humedal .....76



Tabla 27: Parámetros de Reducción típicos del Sistema de Humedal elegido. 77  
Tabla 28: Características de Entrada del Caudal del agua Residual elegida. ....78  
Tabla 29: Límites de Vertido de Agua residual. Fuente: Mapama .....78  
Tabla 30: Resultados del agua de salida del humedal diseñado.....78  
Tabla 31: Parámetros de diseño obtenidos del Filtro Verde .....85  
Tabla 32: Parámetros de eliminación del Filtro Verde .....86  
Tabla 33: Características de Entrada del Caudal del agua Residual elegida ....87  
Tabla 34: Límites de Vertido de Agua residual. Fuente: Mapama .....87  
Tabla 35: Resultados del agua de salida del Filtro Verde diseñado.....87  
Tabla 36: Parámetros de diseño del Desbaste Reja de Finos Comercial .....95  
Tabla 37: Parámetros de diseño del Tanque Imhoff .....96  
Tabla 38: Parámetros de diseño del Humedal.....97

Ilustración 1: Humedal Artificial de Empuriabrava (Girona); Fuente: Sistema  
d´Alguamalls Construlls d´Empuriabrava.....23  
Ilustración 2: Humedal Artificial de Flujo Libre .....26  
Ilustración 3: Humedal Horizontal .....28  
Ilustración 4:Humedal Vertical .....28  
Ilustración 5: Corte transversal de un Humedal Artificial para el secado de lodos  
.....29  
Ilustración 6: Procesos dados en los humedales artificiales. Fuente: García et  
al, 1997 .....35  
Ilustración 7: Distribución geográfica de los humedales artificiales de flujo  
subsuperficial. Fuente: Medina Y.F.; 2012 .....37  
Ilustración 8: EDAR de Fabara (Zaragoza). Fuente: ETS Ing. Agrónomos. UPM  
.....37  
Ilustración 9: Rejas Automáticas SI350. Fuente: www.estruagua.com.....59  
Ilustración 10: Tanque Imhoff .....61  
Ilustración 11: Typha spp. Fuente: Kerry Dressier, 1996 .....67  
Ilustración 12: Scirpus spp. Fuente: Kerry Dressier, 1996 .....68  
Ilustración 13: Phragmites australis. Fuente: Slichter, 2013 .....69  
Ilustración 14: Esquema de un proceso con humedal artificial FHS .....76  
Ilustración 15: Esquema de las diferentes parcelas. Fuente: Fuente.M. et al,  
2010.....79  
Ilustración 16: Esquema del proceso del filtro verde. ....80  
Ilustración 17: Procesos en Populus. Fuente: Cortes A., 2015 .....82  
Ilustración 18: Principales estrategias implicadas en la Fitorremediación de  
Populus. Fuente: Cortes A., 2015 .....82  
Ilustración 19: La desintoxicación implica la conjugación seguida de secuestro  
activo en la vacuola, donde el contaminante puede hacer menos daño.  
Fuente Cortes. A., 2015.....83  
Ilustración 20: Entrada a la Zona de construcción .....91  
Ilustración 21: Foto Zona del Construcción de la Tecnología Blanda .....91  
Ilustración 22: Interior .....92  
Ilustración 23: Entrada a Huerta .....92



Ilustración 24: Zona de vertido .....	92
Ilustración 25: Localización de los pueblos. ....	93
Ilustración 26: Sistema de Humedal Artificial implantado en Huerta .....	94



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## 11. BIBLIOGRAFÍA

### **INFORMACION BIBLIOGRÁFICA**

- ACERO.D. Master de Ingeniería Civil: Tratamiento de agua residual a través de humedales. V Congreso Internacional de Ingeniería Civil. Universidad de Santo Tomas Seccional Tunja. Colombia. 2014
- ANDIVIA.E., FERNANDEZ.M., ALAEJOS.J., TAPIAS.R.; 6º Congreso Forestal Español: Consumo de agua de distintas especies leñosas utilizables como cultivos energéticos. ResearchGate. 2013.
- ARIAS.C., BRIX.H. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, nº 13, pp 17-24. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. 2003.
- CORTES. A.; Ciclo de conferencias: Saneamiento Sostenible de Ecosistemas Contaminados por Lindano. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Zaragoza. Huesca. 2015
- FUENTE.M., MATUTE.M.C., MENDEZ.M.; Diseño de un sistema de depuración de aguas residuales. Master en Ingeniería y Gestión ambiental. Nicaragua. 2010.
- GARCIA J, RUIZ A, JUNQUERAS X., Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos. Tecnología del agua. Nº 165, 1997, pag:58-65.
- HUERTAS.R., MARCOS.C.; Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Confederación hidrográfica del Duero. Celarayn S.A. 2013
- LIFE 11 ENV/ES/000569. Informe técnico: tecnologías blandas para el tratamiento de aguas residuales. 2013
- LOPEZ.B., Curso de dimensionado de estaciones de tratamiento de agua residual. Master Ingeniería Ambiental. 2016/2017
- MATAMOROS. V., RODRIGUEZ.Y., ALBAIGES.J. A comparative assessment if intensive and extensive wastewater treatment technologies for removing emerging contaminants in small communities. Water research. Elsevier. Barcelona.2016. Wáter research 88: 777-785



- MEDINA Y.F., ORTEGA E., SALAS. J.J., Tendencias actuales en las tecnologías de tratamiento de las aguas residuales generadas en las pequeñas aglomeraciones urbanas. Ingeniería civil. 168/2012. Madrid. 2012.
- METCALF & EDDY. Wastewater engineering. Treatment and Reuse. 4<sup>o</sup> edition. 2002
- MORENO.L. et al; La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno. 2003
- MULAS.R.; Fitorremediación a partir de *Populus*. Universidad de Valladolid. 2017
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización. OPS/CEPIS/05.163 UNATSABAR. Perú, 2005.
- ROIG.J.; Ingeniería hidráulica y medio ambiente: eliminación de contaminantes emergentes mediante Humedales Artificiales como sistema alternativo o complementario a un tratamiento de aguas convencionales. Tesis. 2012.
- RUSELL.T. Arboles. Guías de la naturaleza. Ediciones Omega. Barcelona, España.2012
- SANCHEZ, F.J.; Hidrología: fórmula de Hargreaves. Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. 2011.

### **INFORMACION WEB**

- [www.agua.imdea.org](http://www.agua.imdea.org)
- [www.estruagua.com](http://www.estruagua.com)
- [www.fbprocedes.es](http://www.fbprocedes.es)
- [www.floresyplantas.net](http://www.floresyplantas.net)
- [www.floravascular.com](http://www.floravascular.com)
- [www.insht.es](http://www.insht.es)
- [www.mapama.es](http://www.mapama.es)