

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES



**ESTUDIO Y DIMENSIONADO EXPERIMENTAL DE
HUMEDALES ARTIFICIALES PARA LA MEJORA DE
LA CALIDAD DE AGUAS DE CURSOS FLUVIALES
EUTROFIZADOS**

TRABAJO FIN DE GRADO

Junio-2015

AUTOR: Borja Mateu Romero

DIRECTOR: Ignacio Meléndez Pastor

Agradecimientos

A mi familia, fuente de apoyo incondicional durante estos años, a mi abuela, Francisca López, por confiar en mí. La presencia de tu ausencia me vuelve cada día más capaz.

Al Dr. Ignacio Meléndez Pastor por su valiosa ayuda, su gran paciencia y su ejemplar dedicación, por estimular mi interés por la investigación y compartir conmigo su enorme capacidad de trabajo. Gracias a su confianza y su permanente disposición ha sido posible la conclusión de este trabajo.

A Irene Amorós Zaragoza, compañera de muestreos y laboratorio.

A la Dr M^a Belén Almendro Candel, por el tiempo dedicado en la determinación del nitrato.

Al Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente por facilitar los medios que han permitido el desarrollo de este trabajo y su culminación.

Por último, a todos aquellos que han aportado su granito de arena.

Estudio y dimensionado experimental de humedales artificiales para el tratamiento de aguas de cursos fluviales con elevados niveles de eutrofización.

Resumen

En los últimos años se ha pasado de una gestión del agua desarrollista, a otra más cuidadosa, evitando crear nuevos problemas al resolver otros. En la búsqueda de métodos para el tratamiento de aguas contaminadas destacan los tratamientos simples, con baja producción de lodos y consumo energético mínimo. Estas premisas obligan a replantear el uso de sistemas naturales para resolver los problemas en la gestión hídrica.

Entre estas tecnologías, los humedales artificiales se postulan como sistemas dominantes. Estos sistemas logran la eliminación de sustancias contaminantes a través de mecanismos y procesos naturales con numerosas ventajas frente a los sistemas convencionales. Para su dimensionado e implantación es fundamental conocer como funcionan, los mecanismos de remoción y sus limitaciones.

Palabras clave: humedales artificiales, tratamiento de aguas, eutrofización

Experimental study and dimensioning of constructed wetlands to treat water from rivers with high levels of eutrophication.

Abstract

In recent years it has gone from a developmental water management, to a more careful and avoid creating new problems to solve other. In the search for methods of treating contaminated water include simple treatments, with low sludge production and minimal energy consumption. These assumptions require us to reconsider the use of natural systems to solve problems in water management

Among these technologies, constructed wetland systems are postulated as dominant. These systems achieve removal of contaminants through natural mechanisms and processes with many advantages over conventional systems. For dimensioning and implementation it is essential to know how they work, the removal mechanisms and limitations.

Keywords: constructed wetlands, water treatment, eutrophication

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Generalidades de los humedales	2
1.3. Clasificación	4
1.4. Mecanismo de remoción	7
1.5. Rango de aplicación	9
2. Aplicación de los Humedales artificiales.	10
2.1. Lago Taihu, China	10
2.2. Valencia, España.	12
2.3. Cinco décadas de experiencias con humedales artificiales.	13
3. Fundamento del dimensionado de humedales construidos de flujo libre y subsuperficial horizontal para el tratamiento de aguas contaminadas.	14
3.1. Diseño biológico	15
3.2. Diseño hidráulico	16
4. Propuesta numérica para el dimensionado de un humedal artificial en el río Vinalopó.	17
4.1. Características del afluente	18
4.2. Propuesta del sistema de depuración	19
4.3. Determinaciones preliminares	20
4.4. Tratamientos previos	21
4.5. Tratamiento primario	27
4.6. Tratamiento secundario	31
4.6.1. Humedal de flujo subsuperficial	33
4.6.2. Humedal de flujo superficial	35
4.7. Discusión	36
5. Conclusiones	37
6. Bibliografía	39

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de las aguas y su depuración es una problemática presente a nivel mundial. Cada año mueren más personas a causa de un agua insalubre que por muerte violenta, incluida la guerra. La fuente más importante de contaminación del agua es la falta de gestión y tratamientos adecuados de los residuos urbanos, industriales y agrícolas, tal como declaró la ONU en el Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida” (Water for life decade, 2014)

En el año 2015 finaliza el Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida” 2005-2015. El gran desafío del Decenio consiste en dirigir la atención hacia políticas y actividades proactivas que garanticen a largo plazo una gestión sostenible de los recursos hídricos. Un ejemplo es la Directiva 2000/60/CE conocida como la Directiva Marco del Agua (DMA) que tiene por objetivo garantizar el buen estado de los sistemas acuáticos, tanto en calidad como en cantidad.

En la búsqueda de nuevas tecnologías para intentar solventar este problema se tiene cada vez más en cuenta la sostenibilidad ambiental. En los últimos años han surgido una alta variedad de métodos para el tratamiento de las aguas, si bien los altos costes económicos y de operación de los procesos modernos de tratamiento obligan a replantear el uso de sistemas naturales para resolver los problemas de gestión hídrica. Entre estas tecnologías, los humedales artificiales o contruidos (*Constructed wetlands*) se postulan como sistemas dominantes. Estos sistemas logran la eliminación de sustancias contaminantes a través de mecanismos y procesos naturales, diferenciándose de los sistemas convencionales por el nulo consumo energético y una mayor superficie de tratamiento (García y Corzo, 2008). Los sistemas naturales de tratamiento de agua residual constituyen una alternativa en auge desde la década de los años 70 en Europa (Vymazal, 2002) y desde los 90 en España (Puigagut et al., 2007).

Las funciones de los humedales resultan de las interacciones entre los procesos naturales (físicos, químicos y biológicos) y los componentes estructurales (geomorfología, hidrología, suelo, flora, fauna, y microbios). Se pueden resumir en: contener las inundaciones, recarga de aguas subterráneas, retención de sedimentos y nutrientes, eliminación y retención de carbono, mantenimiento del ecosistema y cómo hábitat, observación de aves, la educación, investigación y la mejora del paisaje (Idris et al, 2010). Además de su aplicación para el tratamiento de aguas residuales se emplean para el tratamiento de residuos de minería, lixiviados ganaderos e industriales, etc. Es habitual su uso para la mejora de la calidad de cauces naturales, ríos y lagos contaminados como se muestra en este documento y el cuál es el principal objeto de estudio.

1.1. Objetivos

A continuación se muestran los propósitos a conseguir en este trabajo:

- Revisión bibliográfica del empleo de humedales para la mejora de la calidad de aguas contaminadas.
- Evaluar la posibilidad de tratar caudales de ríos contaminados mediante un sistema de humedales artificiales.

- Síntesis y propuesta de un método para la mejora de aguas naturales eutrofizadas, en concreto para el río Vinalopó a su paso por Elche.
- Diseño, cálculo y dimensionado de un sistema compuesto por humedales artificiales.

1.2. Generalidades de los humedales

Los humedales naturales son cavidades que ocurren en las zonas bajas, donde reciben el agua de escorrentía y el desbordamiento de ríos y arroyos. Esta situación de inundación (permanente o temporal) y arrastre de sedimentos ha originado varios mecanismos para el tratamiento de estos flujos, rompiendo una amplia gama de contaminantes en compuestos elementales (Idris et al, 2010). Por lo tanto estos sistemas tienen una habilidad natural innata para tratar las aguas.

Los humedales artificiales son una alternativa eco-tecnológica para el tratamiento de todo tipo de aguas. Están diseñados para superar las desventajas de los humedales naturales y potenciar sus cualidades, tales como la fiabilidad, rentabilidad y versatilidad, además de un gran potencial de tratamiento, ya que pueden tratar varios tipos de contaminantes¹ simultáneamente a niveles satisfactorios en comparación con otros sistemas de tratamiento convencionales (Idris et al, 2010; García y Corzo, 2008)

Correctamente diseñados y contruidos no se requiere de adiciones químicas ni de otros procedimientos convencionales. Las reacciones se producen a velocidades ambientales, requiriendo mayor tiempo de retención hidráulico y por ello mayores superficies (sistema extensivo) para tratar el mismo caudal de agua que en los sistemas convencionales o intensivos.

Un humedal construido consta de una cuenca bien diseñada que contiene agua, un sustrato y vegetación de macrófitos (cuando proceda). Otros componentes como las comunidades microbianas y los invertebrados acuáticos se desarrollan de forma natural. La funcionalidad viene derivada de los tres principales componentes (sustrato, vegetación y comunidad microbiana) en contacto con el agua (Figura 1):

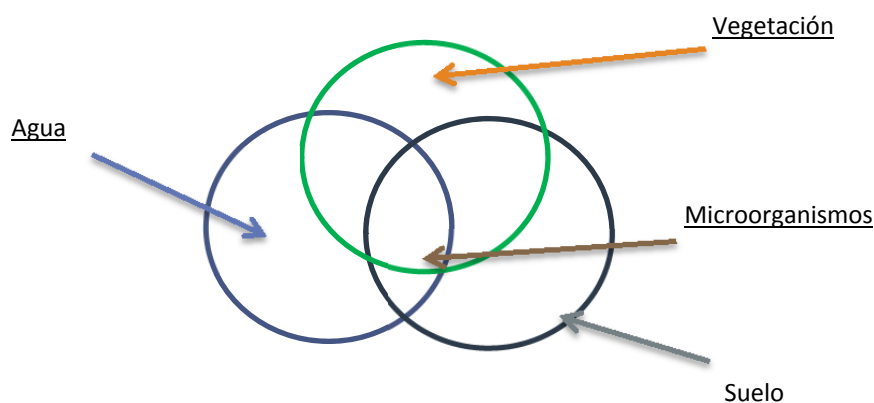


Figura 1: Relación entre los principales componentes del humedal artificial. Fuente de elaboración propia.

¹ Contaminante: Una sustancia que se encuentra en un medio al cual no pertenece o que lo hace a niveles que pueden causar efectos (adversos)

Agua: El agua es más que un solvente y está constituida por componentes físicos, químicos y biológicos. Es el elemento más importante de los humedales construidos ya que está directamente relacionado con la hidrología y conecta todas las funciones del humedal. Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos en el humedal y en la efectividad del tratamiento. Tenemos que tener en cuenta el balance hídrico (i.e., caudal, precipitaciones, evapotranspiración,...) además de las concentraciones de contaminantes en el afluente y las concentraciones requeridas o deseadas en el efluente.

Sustrato: el medio granular es el encargado de la retención y sedimentación de la materia en suspensión. En él se da la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de nutrientes y la inactivación de los microorganismos patógenos por el biofilm². Es necesario considerar el tipo de sustrato (i.e., tamaño del material, porosidad y conductividad hidráulica) ya que afecta a la adsorción y a la resistencia hidráulica.

Vegetación: Los macrófitos estabilizan la superficie del humedal, ofrecen buenas condiciones para filtración física y proporcionan una gran área superficial para el crecimiento microbiano adjunto (biofilm). Además de buenos resultados de absorción, reducen la velocidad del agua, aumentando la sedimentación y el tiempo de contacto entre la superficie del efluente y el de la planta. Además crean macroporos en el sustrato, permitiendo una mayor percolación del agua y promoviendo condiciones aeróbicas por la transferencia de oxígeno a través de la rizosfera. Indudablemente ensalzan los valores estéticos y generan un hábitat para la fauna.

Una de las plantas macrófitas más utilizada para la fitodepuración es el carrizo común (*Phragmites australis*. Cav). Presenta una amplia distribución mundial en aguas dulces y salobres. Es la especie acuática más efectiva en los humedales construidos debido a su mayor profundidad de enraizamiento frente a otras macrófitas similares. Además puede resistir el fuego, el hielo y un pH elevado, junto con déficit hídrico y altas concentraciones de sales. Una de las ventajas más destacables es el alto poder de transferencia de oxígeno al suelo por parte de las raíces por medio de aerénquimas³. Aunque el macrófito más utilizado es el carrizo, en algunos casos es posible encontrar otras especies tales como *Typha sp*, *Bolboschoenus maritimus*, *Scirpus holoschoenus*, *Juncus acutu*, *Scirpus mucronatus*, *Cyperus rotundus*, *Iris pseudacorus* (Rodrigo et al, 2013) y por lo general se utilizan cultivos mixtos en el mismo sistema (Puigaut et al, 2007)

Comunidad microbiana: Los principales microorganismos presentes en el biofilm de los humedales construidos son bacterias, levaduras, hongos y algas. Estos consumen gran parte del carbono y muchos nutrientes. La principal función de la actividad microbiana es transformar gran número de sustancia orgánicas e inorgánicas en otras inocuas e insolubles.

En este aspecto se debe tener en cuenta determinados parámetros (como pH, Tª,...) para que se puedan desarrollar las comunidades microbianas.

² *Biofilm*: ecosistema microbiano de uno o varios microorganismos asociados a una superficie formando una comunidad con características funcionales y estructuras complejas.

³ *Aerénquima*: es un tejido vegetal parenquimático con grandes espacios intercelulares llenos de aire, propio de plantas acuáticas sumergidas o de las palustres que se desarrollan en medios pobres en oxígeno

1.3. Clasificación

La operación y eficiencia del humedal depende en gran medida de la hidráulica del sistema, por ello la clasificación más extendida es acuerdo al comportamiento hidráulico. Se clasifican en dos grandes grupos (Idris et al, 2010):

- Humedales de flujo superficial
- Humedales de flujo subsuperficial

La diferencia primordial se basa en que los de flujo superficial el agua está en lámina libre mientras que en los de flujo subsuperficial el nivel del agua se encuentra bajo un sustrato (Kadlec et al, 2000). A continuación se describen los distintos tipos de humedales artificiales atendiendo a la clasificación descrita:

Humedal artificial de flujo superficial (HFS) o Flujo libre (FWS): En apariencia y función son similares a los humedales naturales y también a los sistemas de lagunaje tradicionales (son menos profundos y cuentan con vegetación plantada). Su implementación se basa en una capa de suelo utilizada como zona de enraizamiento, vegetación, que favorece el crecimiento microbiano adjunto, y una lámina de agua visible a una altura relativamente superficial con unos 30-40cm de profundidad (Figuras 2 y 3). Es la configuración que mayores eficiencias representa en la desnitrificación (hasta 96%).

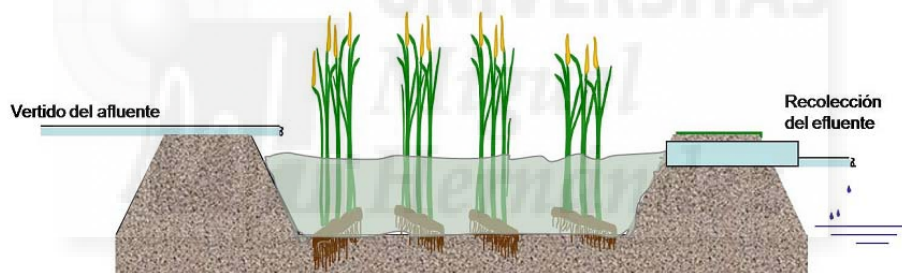


Figura2: Corte longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial. Fuente: García y Corzo, 2008.

Estos humedales suelen ser instalaciones de varias hectáreas, que principalmente tratan efluentes procedentes de tratamientos secundarios, y también se emplean para crear y restaurar ecosistemas acuáticos.

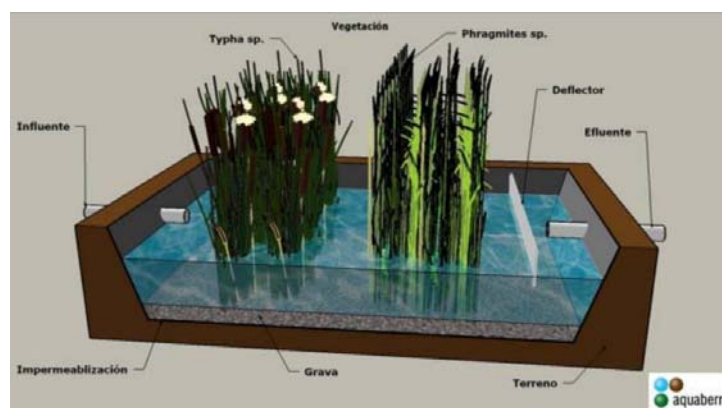


Figura 3: Representación 3D de un Humedal Artificial de Flujo Superficial. Fuente: Aquaberri.

La alimentación de caudal se realiza de forma continua y la depuración tiene lugar en el tránsito de las aguas a través de los tallos y raíces de la vegetación (los tallos raíces y hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación). Las hojas dan sombra a la masa de agua, limitando el desarrollo de microalgas.

Humedales artificiales de flujo subsuperficial

Este tipo de humedales por lo general son instalaciones de menor tamaño. Dado que el agua circula subsuperficialmente, evitan problemas de aparición de mosquitos y de olores, siendo menos sensibles a los descensos de temperatura ambiente.

Como desventajas cabe destacar el mayor coste constructivo por el coste del sustrato, los mayores riesgos de colmatación y el menor valor ambiental del humedal.

Según la dirección en la que circulan las aguas a través del sustrato, los humedales artificiales de flujo subsuperficial se clasifican en:

- Humedales artificiales de flujo subsuperficiales horizontales
- Humedales artificiales de flujo subsuperficiales verticales

Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HFSSH):

En estos sistemas la alimentación de caudal se efectúa de forma continua, estando permanentemente inundados, si bien hay algunas experiencias que muestran buenos resultados con funcionamiento intermitente. No presentan lámina de agua a la vista. El agua fluye lentamente de forma horizontal desde la zona de entrada a través de un medio poroso (de unos 0,4 a 0,9 m de espesor) que además de una superficie filtrante ofrece considerables espacios para el crecimiento de los microorganismos encargados de la depuración, hasta ser recogida y descargada por una estructura reguladora de nivel en la zona de salida (Figuras 4 y 5). Con la vegetación adecuada se consiguen altas tasas de nitrificación en este tipo de humedal, tal como muestran las experiencias durante más de 20 años en la Planta experimental de Carrión de los Céspedes, Sevilla (García, 2015).

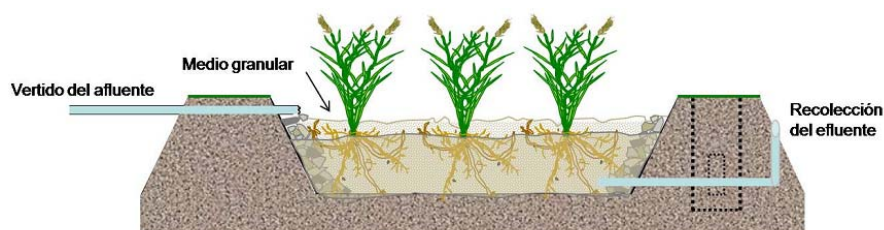


Figura 4: Sección longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Fuente: García y Corzo, 2008.

El proceso de tratamiento ocurre en la zona de raíz y en la superficie de la arena, grava o gravilla utilizada como sustrato del lecho.

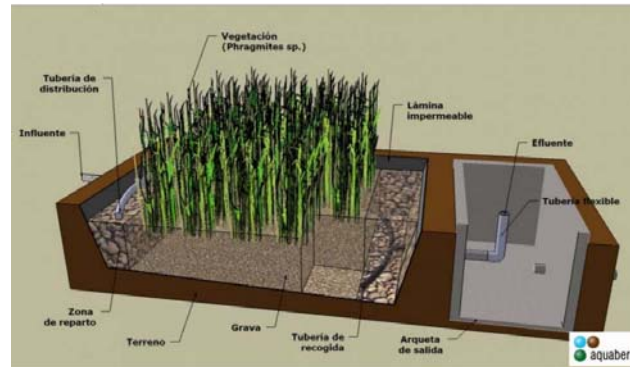


Figura 5: Representación 3D de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal. Fuente: Aquaberri.

Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (HFSSV):

Estos sistemas surgieron como evolución de los humedales de flujo subsuperficial horizontal. Se diseñan con flujo intermitente, es decir, tienen fase de llenado y vaciado, lo que le confiere propiedades muy diferentes respecto a los otros sistemas. Los residuos líquidos se aplican de manera uniforme en la parte superior de una celda plana en forma de riego, percolando de forma vertical a través de la misma y recolectada mediante tuberías perforadas tendidas en el fondo (Figura 6). Estos sistemas presentan mejores tasas de transferencias de oxígeno pero no son adecuados para la desnitrificación. Es el sistema que menor superficie necesita, pero por otra parte necesita un mayor mantenimiento y número de operaciones (ya que cuenta con sistemas mecánicos y eléctricos), además de una peor integración paisajística.

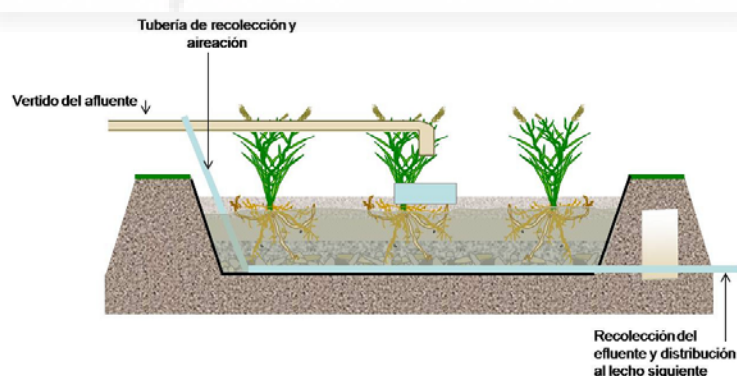


Figura 6: Sección de un Humedal de Flujo Subsuperficial Vertical Fuente: García y Corzo, 2008.

En el fondo del humedal una red de drenaje permite la recolección y aireación del efluente. En algunas ocasiones se añaden unas chimeneas con el objeto de incrementar la oxigenación del sustrato filtrante, tal como se muestra en la siguiente imagen (Figura 7):

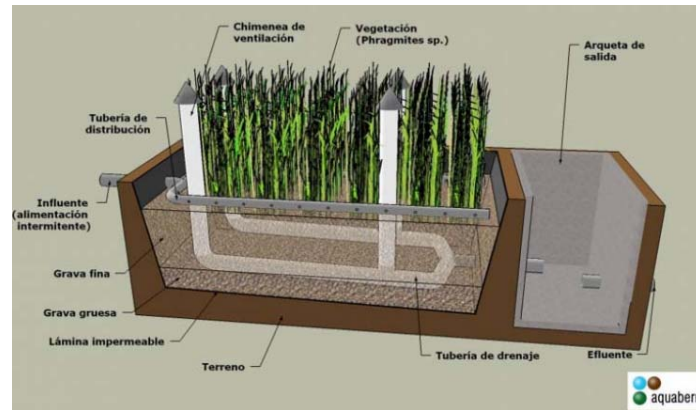


Figura 7: Representación 3D de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical. Fuente: Aquaberri.

Sistemas de humedales híbridos: se denominan así a la combinación de diferentes tipos de humedales de los anteriormente descritos. Cuentan con las ventajas específicas de cada humedal, consiguiendo así mayores eficiencias de eliminación. Se pueden combinar todos los tipos, siendo el más común el HFSSV + HFSSH a nivel mundial, pero en España sobresale el uso de humedales de flujo horizontal en combinación con otros (Puigaut et al, 2007). Cabe destacar que en los últimos años este tipo de sistemas está en auge, no solo combinado con humedales sino con otras tecnologías tanto convencionales como no convencionales.

1.4. Mecanismo de remoción

La depuración en el sistema humedal resulta de la relación entre los procesos físicos, químicos y biológicos con los componentes del sistema. El humedal se diseña en función de la remoción del tipo de contaminantes, siendo necesario entender estos mecanismos para asegurar que el humedal está bien diseñado. Los humedales pueden ser dimensionados para el tratamiento eficaz de sustancias demandantes de oxígeno (DBO, DQO), sólidos en suspensión (SS), nutrientes (N y P), así como para la disminución de metales, contaminantes orgánicos y agentes patógenos. Los principales mecanismos de remoción son los biológicos, como la actividad metabólica microbiana y absorción de las plantas, y los procesos físico-químicos, tales como la sedimentación y adsorción (Tabla 1).

- **Materia orgánica:** presente en forma de materia en suspensión sedimentable, irá decantando en los humedales (y tratamientos previos si existen) y experimentará procesos de degradación biológica. Igualmente, parte quedará retenida por filtración. Sobre la materia orgánica disuelta, al igual que sobre la particulada, actúan los microorganismos (principalmente bacterias) que utilizan esta materia orgánica a modo de sustrato.
- **Sólidos en suspensión:** se eliminan fácilmente por sedimentación (debido exclusivamente a la gravedad) ya que generalmente tienen altos tiempos de retención hidráulica y la vegetación disminuye la velocidad de paso del agua. La filtración de las aguas se origina por su paso por el sustrato, raíces, rizomas y tallos de las planta. También existen mecanismos de floculación, formándose agregados de las partículas que decantan posteriormente. Esta retención de la materia en suspensión se da por tres motivos (García et al, 2015): 1) baja velocidad de las aguas; 2) las fuerzas de adhesión entre partículas; y 3) las constricciones del flujo

producidas tanto por el medio granular como por el entramado de raíces y rizomas. Son por tanto un conjunto de mecanismos físicos los que contribuyen a la eliminación de los sólidos en suspensión. Existen valores de eliminación de hasta el 95%. Para evitar la rápida colmatación de los sustratos filtrantes del humedal se hace imprescindible la existencia previa de un pretratamiento e incluso un tratamiento primario, que eliminen gran parte de la materia en suspensión a tratar.

Tabla 1: Muestra los principales mecanismos de eliminación en los humedales artificiales. Fuente Idris et al, 2010

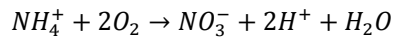
Contaminante	Mecanismo de eliminación
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Oxidación Absorción Filtración Sedimentación Descomposición Microbiana
Sólidos en Suspensión (SS)	Filtración Sedimentación
Nitrógeno (N)	Absorción Asimilación Adsorción Amonificación Nitrificación-Desnitrificación
Bacterias, Patógenos y Virus	Adsorción Predación Sedimentación Esterilización UV
Metales Pesados	Adsorción Intercambio de cationes Bioacumulación
Otros contaminantes	Precipitación Evaporación Evapotranspiración

- **Eliminación de nutrientes:** está relacionada con la variabilidad en la carga de entrada, de forma que los porcentajes de retención de los mismos disminuirán con el incremento de la misma. Otro factor que influye en la eficacia de remoción es el estado de estabilización y madurez del sistema tanto del sustrato como de la vegetación, obteniendo mayores rendimientos en la etapa de mayor desarrollo de la vegetación (primavera y verano)

El fósforo suele eliminarse en los humedales por absorción directa por parte de las plantas, por adsorción sobre el sustrato (partículas de arcilla, orgánicas, compuestos de hierro y aluminio) y precipitación con hierro, aluminio y calcio presente en las aguas. También existen datos de incorporación en forma de ortofosfato a la biomasa bacteriana. Aun así, los rendimientos no superan el 30% de eliminación, si bien se están obteniendo mejores rendimientos con el empleo de sustratos filtrantes específicos.

El nitrógeno en las aguas se encuentra principalmente en forma orgánica y amoniacal (en menor cuantía como nitritos o nitratos). Mediante amonificación el nitrógeno orgánico se transforma en amoniacal, y su eliminación en los humedales artificiales transcurre principalmente mediante dos vías: 1) asimilación por las propias plantas

(no llega a superar el 20% del nitrógeno amoniacal y necesita la posterior siega y retirada); y 2) mediante procesos de nitrificación-desnitrificación. La nitrificación es necesaria para liberar el amonio adsorbido sobre las partículas de sustrato, en estas reacciones se necesita oxígeno y es realizado por bacterias autótrofas:



Proceso de nitrificación englobado en una sola ecuación

En la nitrificación se obtiene nitrógeno en forma nitrato, si bien esto no supone una eliminación del exceso de nitrógeno presente en el agua, siendo para ello necesaria una etapa consecutiva de desnitrificación. La desnitrificación necesita pH entre 7-8 y carbono orgánico como sustrato para las bacterias heterótrofas que la realizan en condiciones de anoxia; estas bacterias devuelven el nitrógeno (N₂) a la atmósfera continuando así con el ciclo de nitrógeno (Schlesinger y Bernhardt, 2013).

- **Patógenos:** su eliminación es de gran complejidad, ya que dependen de factores como la filtración, adsorción sobre las partículas del medio filtrante, la depredación por protozoos y bacteriófagos y la toxicidad sobre los organismos patógenos que ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas. Se ha observado que la eliminación es dependiente del tiempo de permanencia y del medio granular.
- **Metales pesados:** son inmovilizados en los suelos y los macrófitos acuáticos los absorben en el tejido vivo. La descomposición de hojarasca contribuye a la adsorción y precipitación. Los metales pesados también se reducen gracias a la absorción directa por las plantas de humedales, aunque los datos sobre rendimiento son escasos, sin olvidar que estos metales pueden volver a liberarse en determinadas épocas del año en función de las variaciones del potencial de óxido-reducción.
- **Otros contaminantes:** como los denominados contaminantes emergentes (tensioactivos, productos farmacéuticos, de uso personal y limpieza, microorganismos como *Cryptosporidium*, etc) se están estudiando. Por otra parte la evapotranspiración (se relaciona con la adsorción mineral) se podría utilizar como un índice de la capacidad de purificación de agua de las plantas.

1.5. Rango de aplicación

Los humedales artificiales se emplean por lo general en rangos de aplicación de aguas residuales de menos de 2000 habitantes equivalentes (hab-eq), ya que los requisitos de superficie (principal limitante de aplicación) oscilan entre los 1 y los 7 m²/hab-eq (Puigaut et al, 2007), estos sistemas como cualquier otro sistema de depuración de aguas, presenta una serie de ventajas e inconvenientes que pueden aconsejar o no su utilización en cada caso concreto (Tabla 2):

Tabla 2: Resumen de las principales ventajas e inconvenientes de los humedales artificiales. Fuente: García y Corzo, 2008; Idris et al, 2010; García, 2015; Ortega et al, 2010.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Bajos costes operacionales - Bajo consumo de materiales y energía - Remoción de amplia gama de contaminantes - Modelo natural y sostenible (no requiere adiciones químicas) - Múltiples beneficios extra (uso sostenible de plantas acuáticas locales, estética) - Puede tolerar tanto grande como pequeños volúmenes y variedad en la concentración de contaminantes - No producción de fango 	<ul style="list-style-type: none"> - Costes de construcción medio-alto (sustrato) - Se necesita amplia extensión de terreno - Acumulación de sustancias tóxicas en el suelo - Limitado control operacional sobre los procesos - Habitual errores de diseño y falta de mantenimiento

2. APLICACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.

A continuación se presentan algunas aplicaciones relevantes de los humedales artificiales para la mejora de la calidad de las aguas en ecosistemas naturales, así como una breve síntesis de la evolución de estos sistemas de depuración en el último medio siglo:

2.1. Lago Taihu, China

Se encuentra entre los tres lagos más contaminados del país, ya que durante las últimas tres décadas, el lago Taihu ha sido utilizado para múltiples propósitos como: abastecimiento de agua, control de inundaciones, transporte, deposición de residuos por parte de las fábricas próximas, pesca y turismo. Desempeña, por lo tanto, un papel extremadamente importante en la economía y el desarrollo social (Li et al., 2007). El gobierno de China ha considerado que se trata de un desastre natural, pese al claro origen antrópico de la marcada y creciente degradación ambiental (Figura 8)



Figura 8: Lago Taihu, China, 2007. Foto: Reuters, vía Today online

En busca de una solución, en el año 2004 se construyeron tres humedales artificiales a escala piloto con lo diferentes formatos de flujo de agua en los que se experimentó sus capacidades para purificar el agua eutrofizada del lago (Li et al., 2007). Los humedales construidos pueden ser muy efectivos en el tratamiento de la contaminación de nutrientes, así como en la restauración de los ecosistemas lacustres. Sin embargo, antes de la acción real debe llevarse a cabo un cuidadoso diseño y construcción. El objetivo principal de dicho estudio fue comparar la eficiencia de eliminación de nutrientes de diferentes tipos de humedales y evaluar la posibilidad de utilizarlos a gran escala para purificar la mayoría de las masas de agua naturales de China con problemas de eutrofización (hasta el 66% y el 22% de todos los lagos en China, son eutróficos e hipereutróficos, respectivamente).

En la Tabla 3 se muestran los resultados de eliminación de contaminantes mediante los tres diseños de humedal construido experimentados. De los resultados obtenidos se puede concluir que estos sistemas son eficaces en el tratamiento de aguas eutrofizadas, obteniendo mejores resultados para los humedales de flujo subsuperficial vertical y horizontal en comparación con los de flujo superficial:

Tabla 3: Resultados de eliminación de contaminantes en los distintos humedales del lago Taihu, China Datos resumidos a partir de la Fuente: Li et al, 2007

Tipo de humedal		HFS	HFSSH	HFSSV
Parámetro		% de remoción		
DQO		16,5±13,6	39,6±9,5	40,4±8,7
NH ₄ ⁺ – N		22,8±17,7	32,0±16,1	45,9±26,4
NO ₃ ⁻ – N		34,2±31,4	65,63±38,4	62,9±27,5
NO ₂ ⁻ – N		33,8±34,6	82,6±25,3	78,9±17,7
NT		19,8±17,9	52,1±14,6	51,6±14,7
PT		35,1±33,9	65,7±19,1	64,3±23,4
Parámetro	Concentración afluente	Concentración de salida		
T (°C)	22,3±9,5	21,8±9,9	21,8±9,9	21,7±9,9
DO (mg/L)	7,76±2,3	6,26±4,0	1,80±0,8	1,86±0,53
Eh (mV)	284,0±9,4	283,7±91,8	222,1±96,4	221,5±37,9
pH	7,88±0,3	7,66±0,51	7,62±0,21	7,57±0,14

Por otra parte es imposible lograr una alta eliminación de nitrógeno con una sola etapa de humedales, ya que no puede proporcionar tanto en condiciones aeróbicas y anaeróbicas al mismo tiempo. Es necesaria una mayor investigación para la mejora de la eliminación de nitrógeno por la combinación de humedales a fin de aprovechar las ventajas específicas de cada sistema individual. Mientras tanto, la absorción y almacenamiento de nutrientes por las plantas también fue responsable de la eliminación de N y P en los tres humedales, siendo la recolección de la biomasa importante para la remoción de nutrientes.

En comparación con sistemas de tratamiento convencionales, los humedales son tratamientos de bajo costo, de fácil uso y mantenimiento, puede ser potencialmente aplicada en los países en desarrollo con grave contaminación del agua problemas. Sin embargo, debido a la falta de conciencia, estos sistemas no han sido ampliamente utilizados.

2.2. Valencia, España.

En el año 2009 y con el objetivo de mejorar la calidad de las aguas eutrofizadas, recuperar hábitats y mejorar la biodiversidad del Parque Natural de la Albufera de Valencia, se replantan 40 hectáreas de arrozales con macrófitos óptimos para el tratamiento de aguas, además se adapta el caudal a tratar a las propiedades del nuevo humedal construido. A través de estos humedales se hace circular el agua del Parque Natural para mejorar su calidad (Martín et al, 2012; Rodrigo et al, 2013)

La situación del espacio natural era el resultado de un proceso de eutrofización que comenzó en la década de 1960 con la descarga de aguas residuales no tratadas de origen industrial, agrícola y urbano.

Se crearon tres nuevos ecosistemas acuáticos (Figura 9):

- **1** Un sistema de flujo superficial, que comprende aproximadamente 9 ha, plantado con vegetación emergente, como *Typha spp.*, *Phragmites spp.*, *Bolboschoenus maritimus*,... para la limpieza del agua.
- **2** Un manantial alimentado por fuentes de agua subterránea a través de un pozo artesiano.
- **3** Dos lagunas poco profundas con una superficie de 8 hectáreas por laguna y plantadas con diversas especies de macrófitas sumergidas, como *Myriophyllum spicatum L.*, *Ceratophyllum demersum L.*, *Potamogeton pectinatus L.*, *P. nodosus Poir.*, *P. crispus L.*, ...

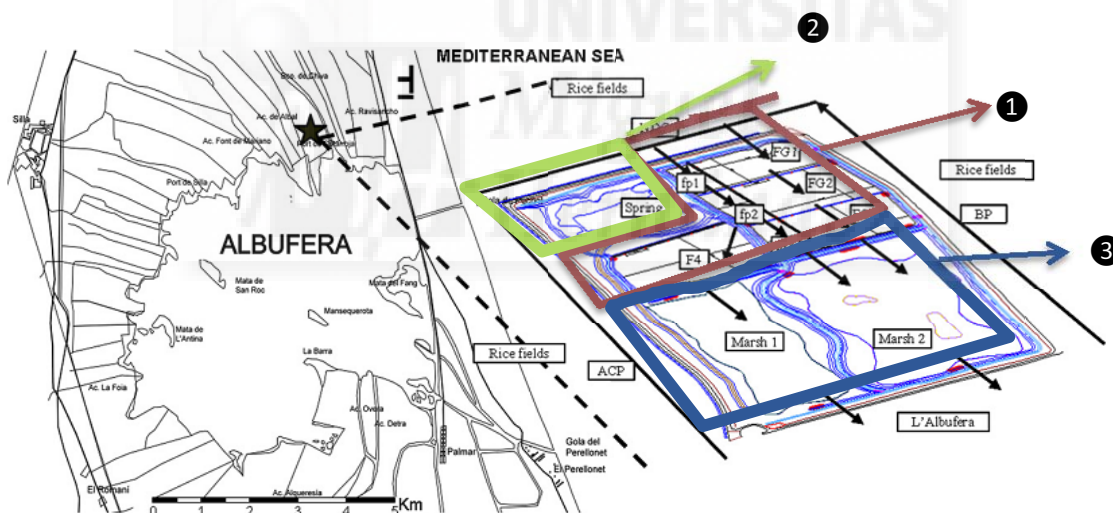


Figura 9: Esquema de la disposición de los ecosistemas en el Parque Natural. Figura modificada a partir de la fuente: Martín et al, 2010.

Cada laguna desarrolló características únicas, tanto hidráulicas o de cobertura vegetal entre otras. Durante el estudio cada laguna exhibió diferentes etapas de eficiencias de remoción de nutrientes y contaminantes. Sin embargo, el resultado final fue similar para ambas lagunas.

Los resultados que se indican son de los primeros cuatro años de funcionamiento, con rendimientos de eliminación en las lagunas del orden de 42% de los sólidos suspendidos totales, el 30% del nitrógeno total y el 49% del fósforo total (Rodrigo et al, 2013)

Estas lagunas constituyen un nuevo ecosistema acuático sostenible para mejorar la calidad del agua y la promoción del desarrollo biológico, ya que una gran variedad de especies colonizó las lagunas (algunas en peligro de extinción). Se recomienda el uso de estos sistemas para la gestión de aguas eutróficas en sitios protegidos.

2.3. Cinco décadas de experiencias con humedales artificiales.

Los primeros experimentos sobre el uso de plantas de humedales para el tratamiento de aguas residuales se llevaron a cabo a principios de 1950 por el Dr. Käthe Seidel en Alemania y los primeros sistemas a escala real se pusieron en funcionamiento a finales de 1960 (Vymazal et al, 2011)

Hoy en día, los humedales construidos son reconocidos como una tecnología de tratamiento de aguas residuales fiable y representan una solución adecuada para el tratamiento de muchos tipos de aguas residuales. Aúnan suelos, sustratos, y biota adaptados a las inundaciones y condiciones asociadas a este tipo de ecosistemas.

Varios autores han señalado el uso de humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales durante más de un siglo. La expansión del uso y conocimiento de las funciones de los humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales ha provocado un cambio de actitud desde la década de 1950. Por desgracia, en algunas partes del mundo el deterioro de los humedales con agua residual persiste. Los humedales naturales todavía se utilizan para el tratamiento de aguas residuales en condiciones controladas, pero se está optando por el uso de humedales artificiales (Vymazal et al, 2011)

Kadlec y Wallace en el 2009 señalaron que los conocimientos actuales nos proporcionan un diseño muy simple pero por otro lado, sería un error pensar que la adición de más factores resultan potencialmente significativos en el diseño más exacto o preciso.

Actualmente la tecnología de tratamiento de aguas en humedales artificiales podría ser caracterizada por las siguientes premisas:

- Combinación de varios tipos de humedales artificiales en sistemas híbridos para lograr un mejor rendimiento del tratamiento, especialmente para el nitrógeno.
- Tratamiento de compuestos específicos presentes en las aguas residuales.
- Búsqueda de medios adecuados con alta capacidad para la eliminación de fósforo.
- Identificación de las bacterias que ayudan en los procesos de tratamiento.
- Diversidad de modelos hidráulicos para la remoción de contaminantes en varios tipos de humedales artificiales. El reciente aumento de la demanda de eliminación amoniaco de aguas residuales tiene como resultado un uso más frecuente de los humedales híbridos.

Esta década se caracteriza por la extensión del uso de humedales para tratar no sólo las aguas residuales municipales, sino también los efluentes de industrias, bodegas, lixiviados de compost, etc. Para las aguas

residuales municipales, se ha demostrado un aumento de la eficiencia en la eliminación de compuestos especiales (e.g., sulfonatos de alquilbenceno lineales) o productos farmacéuticos y de higiene personal (PPCP). Se ha demostrado la presencia de PPCPs, tales como hormonas, fármacos antiinflamatorios no esteroideos, reguladores de lípidos, bloqueadores y medicamentos psiquiátricos en los ríos, lagos, y embalses de todo el mundo. Afortunadamente los humedales artificiales son eficaces en la eliminación de la mayoría de PPCPs (Vymazal, 2011)

Las preocupaciones con respecto a su aplicación han sido refutadas, como la demostración de que funcionan bien en condiciones climáticas frías. Además, el requisito de la tierra es relativamente pequeño, por lo que estos son de uso común, incluso en los países con alta densidad de población, como Dinamarca o los Países Bajos. Sin embargo, los humedales construidos son más adecuados para aplicaciones en pequeñas aglomeraciones urbanas.

Los humedales artificiales tienen limitaciones que deben ser tomadas en consideración cuando se ha seleccionado la tecnología de tratamiento. Aun así, son una alternativa viable en el tratamiento de aguas residuales y en la actualidad hay decenas de miles de aplicaciones en todas partes del mundo.

3. FUNDAMENTO DEL DIMENSIONADO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO LIBRE Y SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS.

La búsqueda de un sistema para el tratamiento de cauces naturales dulceacuícolas, se ha basado en los siguientes criterios marcados por la *Environmental Protection Agency* (EPA) de Estados Unidos en 1977 (Ortega et al, 2010):

- Mínimos costes de operación y mantenimiento (incluyendo la amortización del sistema).
- Nulo (o mínimo) consumo energético.
- Alto rendimiento en la eliminación de compuestos promotores de eutrofización
- Sistemas que soporten las variaciones de caudal (debido a la estacionalidad del lugar) y fiabilidad a lo largo del tiempo.
- Máxima integración paisajística.

Es por ello que se descarta el uso de humedal subsuperficial vertical para este fin, ya que requiere automatización y bombas para los periodos de filtrado, no amortigua bien las variaciones de caudal y tienen una difícil integración paisajística. Además proporcionan el menor valor ecológico de los tres tipos de humedales.

El dimensionado de humedales artificiales se realiza en dos etapas: 1) un dimensionado biológico en el que se determina la superficie necesaria de tratamiento de un contaminante específico; y 2) un dimensionado hidráulico en el que se establecen las dimensiones geométricas del sistema.

3.1. Diseño biológico

En los cálculos para el dimensionamiento se tiene en consideración que todos los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos y su funcionamiento se puede aproximar al de un reactor de flujo a pistón con cinética química de eliminación de contaminantes de primer orden (Idris et al, 2010; Ortega et al, 2010):

$$\frac{dC}{dt} = -K_t \cdot C \quad (1.1)$$

Dónde:

- C: concentración del contaminante (mg/L)
- K_t : constante de cinética de primer orden (d^{-1})

Si se integra la ecuación entre la concentración inicial de contaminante o afluente (C_0 para $t=0$) y la final o efluente (C_i para $t=t$, siendo este último el tiempo de retención, en días) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{C_i}{C_0} = \exp(-K_t \cdot t) \quad (1.2)$$

Por otro lado el tiempo de retención hidráulico⁴ resulta de la siguiente expresión:

$$t = \frac{V}{Q_{med,d}} = \frac{LW(D_m \cdot n + D_w)}{Q_{med,d}} \quad (1.3)$$

Dónde:

- t: tiempo de retención hidráulico (d)
- V: volumen del humedal (m^3)
- $Q_{med,d}$: Caudal medio diario a tratar (m^3/d)
- L: longitud del humedal (m)
- W: ancho del humedal (m)
- D_m : la profundidad del sustrato (m)
- n: la porosidad (*en tanto por 1*)
- D_w : profundidad de la lámina de agua (m)

En el caso de no disponer del caudal medio, se puede calcular a partir del caudal de entrada y el de salida al humedal:

$$Q = \frac{Q_{salida} + Q_{entrada}}{2} \quad (1.4)$$

Combinando las ecuaciones (1.2) y (1.3) se obtiene la ecuación que permite conocer la superficie necesaria para la eliminación de un determinado contaminante (1.5):

⁴ Tiempo de retención hidráulico: tiempo que la molécula de agua permanece en el sistema, desde que entra hasta que sale de este.

$$S = L \cdot W = \frac{Q_{med,d} \cdot (\ln C_o - \ln C_s)}{K_t \cdot (D_m \cdot n + D_w)} \quad (1.5)$$

Dónde:

- S: superficie del humedal (m^2)
- L: longitud del humedal (m)
- W: ancho del humedal (m)
- $Q_{med,d}$: Caudal medio diario a tratar (m^3/d)
- C_s : concentración del contaminante en el agua del efluente (mg/L)
- C_o : concentración del contaminante en el agua del afluente (mg/L)
- K_t : constante de reacción.
- D_m : profundidad del sustrato (m)
- D_w : profundidad de la lámina de agua por encima del sustrato (m)
- n : porosidad del sustrato filtrante (*en tanto por 1*)

La constante de cinética K_t depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura, pudiendo determinarse utilizando la siguiente fórmula:

$$K_t = K_{20} \cdot \Theta^{T-Tr} \quad (1.6)$$

Dónde:

- K_{20} : constante de velocidad (d^{-1})
- Θ : coeficiente de temperatura
- T: temperatura media ($^{\circ}C$)
- T_r : temperatura de referencia ($^{\circ}C$)

Por otra parte, la Tasa de Carga Hidráulica o *Hydraulic Loading Rate* "HLR⁵" (m/d) relaciona el caudal a tratar con el área del humedal:

$$HLR = \frac{Q_{med,d}}{S} \quad (1.7)$$

3.2. Diseño hidráulico

Todos los diseños actuales asumen condiciones de flujo a pistón. El flujo a través del humedal debe superar la resistencia impuesta por el sustrato y vegetación. Esta energía necesaria viene dada por la pérdida de carga; por ello debe existir inclinación en el fondo y una salida de altura variable con el nivel de agua. La relación largo-ancho tiene gran influencia en el régimen hídrico y en la resistencia del flujo del sistema

⁵HLR: Tasa de carga hidráulica, proporciona una medida del volumen de aplicación al humedal.

El dimensionamiento hidráulico sirve para calcular la longitud y la anchura del humedal, una vez determinada su superficie. Este dimensionamiento se lleva a cabo aplicando la Ley de Darcy, que describe el régimen de flujo en un medio poroso mediante la expresión (Ortega et al, 2010):

$$Q_{\text{máx},d} = K_s \cdot S_t \cdot s \quad (1.8)$$

Dónde:

- $Q_{\text{max},d}$: Caudal máximo diario (m^3/d)
- K_s : conductividad hidráulica del medio filtrante ($m^3/m^2 \cdot d$)
- S_t : sección del Humedal artificial perpendicular a la dirección del flujo (m^2)
- s : pendiente del fondo del humedal (m/m)

Dado que con el tiempo la conductividad irá disminuyendo (i.e., crecimiento de la biopelícula “biofilm”, retención de partículas, etc.), se recomienda usar un factor de seguridad 5. Tal que para determinar el área transversal:

$$S_t = \frac{Q_{\text{max},d}}{(K_s/5) \cdot s} \quad (1.9)$$

A partir de la sección transversal y una vez establecida la altura (h) se pueden determinar las dimensiones del humedal:

$$W = \frac{S_t}{h} \quad (1.10)$$

$$L = \frac{S}{W} \quad (1.11)$$

Siendo W el ancho (m); h la altura (m) y L la longitud o lateral del humedal (m).

Una vez determinadas la longitud y anchura del humedal, debe comprobarse que **la relación entre ambas dimensiones es mínimo 1:1**; si esto no ocurre, se procede a dividir la superficie total en varias celdas, de forma que cumplan este requisito (Ortega et al, 2010).

4. PROPUESTA NUMÉRICA PARA EL DIMENSIONADO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EN EL RÍO VINALOPÓ.

A la hora de realizar una adecuada gestión de aguas se hace imprescindible el disponer de una información lo más detallada posible sobre su naturaleza y características. El dimensionado del humedal se basa en las características del agua a tratar y en los límites deseados o requeridos, siendo además es necesario tener conocimientos de tratamiento de aguas, considerar el clima local, disponibilidad de tierras y reutilización prevista del efluente.

4.1. Características del afluente

La propuesta del dimensionado del humedal artificial se ubica en Elche, dónde el clima es mediterráneo semiárido con alto déficit hídrico.

El río Vinalopó atraviesa a lo largo de sus 81 kilómetros de curso un total de 12 municipios antes de llegar a Elche. Tiene como afluentes el río Marchal y el río Tarafa. Además, recibe las aportaciones de las numerosas ramblas que realizan una función de drenaje en las sierras del interior, sobre todo a la altura de Elda-Petrer (ramblas de Pusa, Melva, Sapo y Bateig). A la altura de la Colonia de Santa Eulalia, desemboca también en el río la Acequia del Rey, que aporta aguas de la antigua laguna de Villena, así como aguas de acuíferos de esta ciudad, lo que hace que sus aguas sean constantemente cambiantes. Su reducidísimo caudal, muy mermado por el aprovechamiento de los cultivos del campo de Elche, desemboca en el azarbe de Dalt, a poca distancia del mar, tras un recorrido de 92 km. No obstante, su desembocadura natural está en la antigua albufera de Elche (Gran Enciclopedia Temática de la Comunidad Valenciana, 2009)

Los datos de partida referentes a la precipitación y la evapotranspiración potencial se obtuvieron del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) y se ha calculado el balance hídrico considerando el coeficiente de cultivo (FAO et al, 2006) con *Phragmites australis* (Andreo, 2015) (Tabla 4).

Tabla 4: Balance hídrico mensual y anual por metro cuadrado en Elche considerando *Phragmites australis*.

Fuente: Andreo, 2015

Mes	Evapotranspiración Potencial Corregida (mm/m^2)	Precipitación (mm/m^2)	Balance hídrico (mm/m^2)
Enero	40,05	20,26	-19,79
Febrero	54,40	13,86	-40,55
Marzo	84,81	25,05	-59,76
Abril	116,27	33,28	-82,99
Mayo	137,39	18,61	-118,78
Junio	173,25	9,3	-163,95
Julio	180,40	1,84	-178,56
Agosto	164,31	8,16	-156,11
Septiembre	118,83	43,47	-75,36
Octubre	78,11	34,26	-43,85
Noviembre	47,85	32,79	-15,06
Diciembre	36,03	20,68	-15,35
Total	1231,69	261,55	-970,14

Para el desarrollo del trabajo se realizaron unas campañas de muestreo de aguas a lo largo de 4 puntos del cauce del Vinalopó comprendido entre Aspe y Elche, en las que se analizaron parámetros que permitieran realizar una caracterización fundamental del agua, para así proceder al dimensionado. Estos datos se contrastaron con los disponibles por la confederación hidrográfica del Júcar, corroborando la variabilidad de estos parámetros a lo largo del río.

A continuación se muestran los datos del punto para el cuál se ha estimado adecuado la implantación del sistema de depuración:

Tabla 5: Parámetros analizados en el río Vinalopó

Parámetro	Datos
Caudal medio (m^3/d)	101088,00
T ($^{\circ}C$)	18,60
pH	8,00
CE (mS/cm)	18,4
DBO5 (mg/L)	$\approx 5^*$
DQO (mg/L)	117,80
NO_3^- (mg/L)	20,20
NH_4^+ (mg/L)	1,10
SST (mg/L)	33,20

**Este dato ha sido muy variable a lo largo de los muestreos, dando casi en todas las ocasiones valores nulos. Cuando la relación DQO/DBO5 >2,5 indica que la materia orgánica sea no biodegradable o la presencia de sustancias tóxicas (García, 2015).*

Además de los parámetros físico-químicos analizados, existen otros parámetros presentes en el agua que indican su deterioro como:

- Objetos gruesos: trapos, plásticos, trozos de madera, etc.
- Arenas: arenas y gravas de origen mineral u orgánico.
- Grasas y Aceites: sustancias que al no mezclarse con el agua permanecen en superficie flotando.

Cabe destacar la presencia de agentes patógenos, metales pesados y contaminantes emergentes procedentes de los hábitos de consumo de la sociedad como fármacos, productos de limpieza, etc (CHJ, 2015). La mayor parte de estos no se eliminan en las plantas convencionales. Para estos últimos existen experimentos que demuestran su remoción pero no hay modelos matemáticos cuantitativos.

4.2. Propuesta del sistema de depuración

Las ecuaciones de diseño se han escogido previo estudio de diferentes autores (Kadlec, 2008; Idris, 2010; Ortega, 2010; Vymazal, 2011) y se han elegido los modelos que más se ajustan a las condiciones locales. Como base se han empleado criterios de diseño propuestos en Ortega et al, 2010. Otra fuente considerada para detalles más específicos del diseño viene de las consideraciones basadas en por García, 2015.

El sistema propuesto se divide en tres procesos claramente diferenciables: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario (los humedales propiamente). Entre la gran variedad de tratamientos de aguas se han elegido los que se consideran más apropiados para el caso concreto. A continuación se muestra un esquema con los tratamientos unitarios propuestos (Figura 10). El agua a tratar (**A**) y el efluente de salida (**B**) serán los datos de referencia para el dimensionado. Se iniciará con un pretratamiento, compuesto por un aliviadero **1**, canal de desbaste con rejillas de limpieza manual **2**, desarenador estático **3** y desengrasador **4**. El tratamiento primario compuesto por un taque Imhoff **5**. Y el tratamiento secundario, que estará

compuesto por un sistema híbrido de humedales artificiales que propicie la nitrificación-desnitrificación, mediante un humedal de flujo subsuperficial **6** seguido de un humedal de flujo superficial **7**.

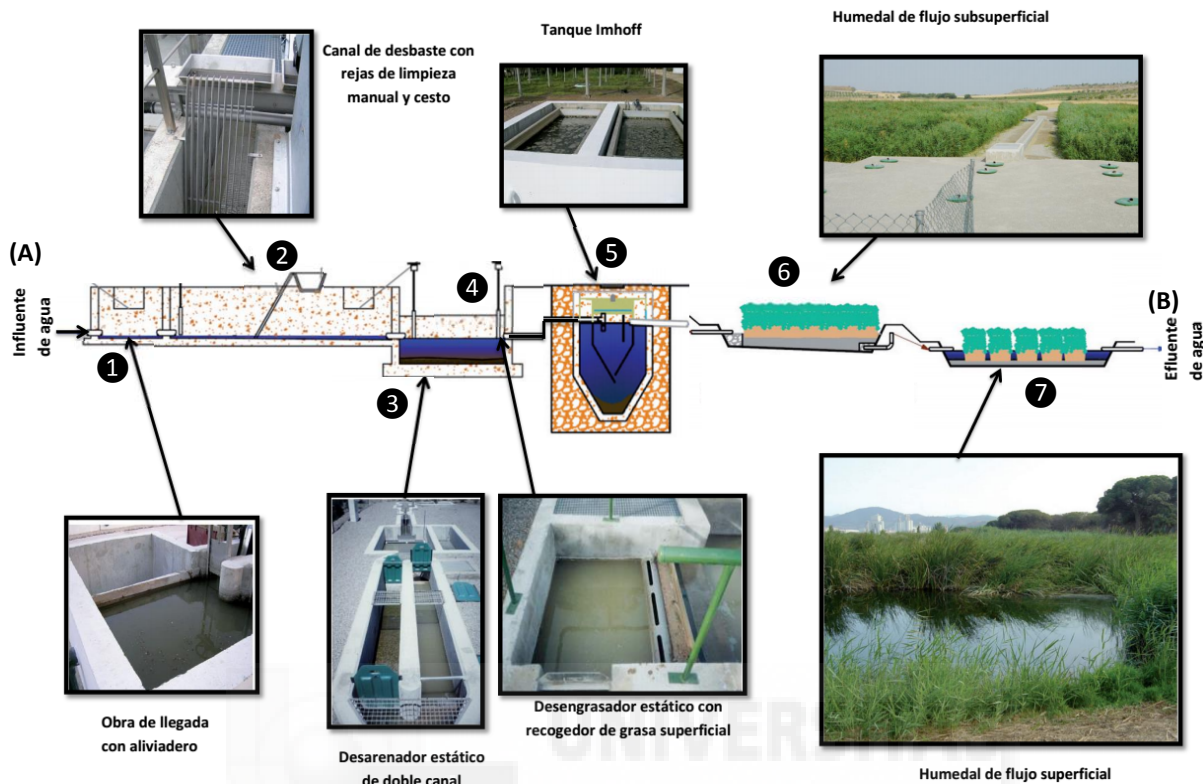


Figura 10: Esquema del sistema de depuración propuesto. Figuras modificadas a partir de la fuente Ortega et al, 2010 y García, 2015.

4.3. Determinaciones preliminares

Antes de comenzar con el dimensionado del humedal y sus tratamientos previos es necesario considerar unos determinados caudales; se han seguido las recomendaciones de García y Corzo, 2008:

Caudal medio diario (Q_{med,d}): este viene determinado por la necesidad o los requerimientos del caudal a tratar, puede ser el total o un porcentaje (m^3/d)

El caudal medio medido, cómo muestra la tabla 5 ha sido de $101088 m^3/d$; no es necesario tratar el total del caudal para obtener los rendimientos requeridos.

Estudios experimentales con cargas similares a las nuestras han reportado valores de salida del humedal entorno a los $1,0 mg/L -NO_3^-$; en nuestro caso se estima una salida del humedal de $5 mg/L -NO_3^-$ y a partir de este se deduce el caudal necesario a tratar para cumplir con los requerimientos de concentraciones en el río.

El Q_{med,d} a tratar es de $34583 m^3/d$ lo que supone un 34% del caudal medido. A partir de este dato se dimensiona el humedal y los siguientes caudales:

Caudal medio horario (Q_{med,h}): es igual al caudal medio diario dividido entre las horas el día (m^3/h)

$$Q_{med,h} = \frac{Q_{med,d}}{24} \quad (2.1)$$

Caudal punta diario (Qpunta,d): corresponde al producto del caudal medio diario por el coeficiente punta "1,7" valor usual (m^3/d)

$$Q_{punta,d} = Q_{med,d} \cdot 1,7 \quad (2.2)$$

Caudal punta horario (Qpunta,h): se obtiene mediante la aplicación de la siguiente ecuación (m^3/h):

$$Q_{punta,h} = Q_{med,h} \cdot \left(1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_{med,h}}}\right) \quad (2.3)$$

Caudal máximo diario (Qmax,d): se considera como el caudal punta diario dos veces (m^3/d) tal que:

$$Q_{max,d} = Q_{punta,d} \cdot 2 \quad (2.4)$$

Caudal máximo instantáneo (Qmax,i): este caudal se utiliza para calcular el aliviadero, es diez veces el caudal medio (m^3/d)

$$Q_{max,i} = Q_{med,d} \cdot 10 \quad (2.5)$$

Caudal mínimo diario (Qmin,d): se toma un valor correspondiente al 30% del caudal medio diario (m^3/d)

$$Q_{min,d} = Q_{med,d} \cdot \frac{30}{100} \quad (2.6)$$

Caudal de lluvia (Qlluv): es el resultado del caudal medio diario más el caudal proveniente de las lluvias que llega a la estación de tratamiento (m^3/d)

*Dado que el caudal de lluvia en el cauce sería muy elevado y no se va a tratar el total del caudal, el Qlluvia se estima a partir de un coeficiente que asegure la dilución de contaminantes en el río.

Tabla 6: Datos de caudales obtenidos.

Qmed,d medido(m^3/d)	Qmed,d a tratar(m^3/d)	Qmed,h (m^3/h)	Qpunta,d (m^3/d)	Qpunta,h (m^3/h)	Qmax,d (m^3/d)	Qmax,i (m^3/d)	Qmin,d (m^3/d)	Qlluv (m^3/d)
101.088	34.583	1.441	58.791	2.256	117.581	345.827	10.375	1.493.974

4.4. Tratamientos previos

Como todo sistema de tratamiento de aguas, debe contar antes con una serie de pretratamientos que permitan el correcto funcionamiento y mantenimiento de los tratamientos unitarios. Estos eliminan la mayor cantidad posible de aquellas materias que, por su naturaleza o tamaño, podrían originar problemas en los posteriores tratamientos unitarios (García et al, 2008) pudiendo llegar a colmatar el humedal.

Las distintas operaciones que constituyan el pretratamiento dependerán, en cada actuación concreta, de la calidad del agua bruta y del tipo de pretratamiento posterior entre otros factores. Para este caso, el

dimensionado se enfoca al tratamiento de un sistema natural dulceacuícola, aunque también sería aplicable a depuración en pequeñas poblaciones.

Los tratamientos previos están compuesto por los tratamientos unitarios ①-④ (pretratamiento) y por el ⑤ (tratamiento primario) tal como se muestra en la Figura 11.

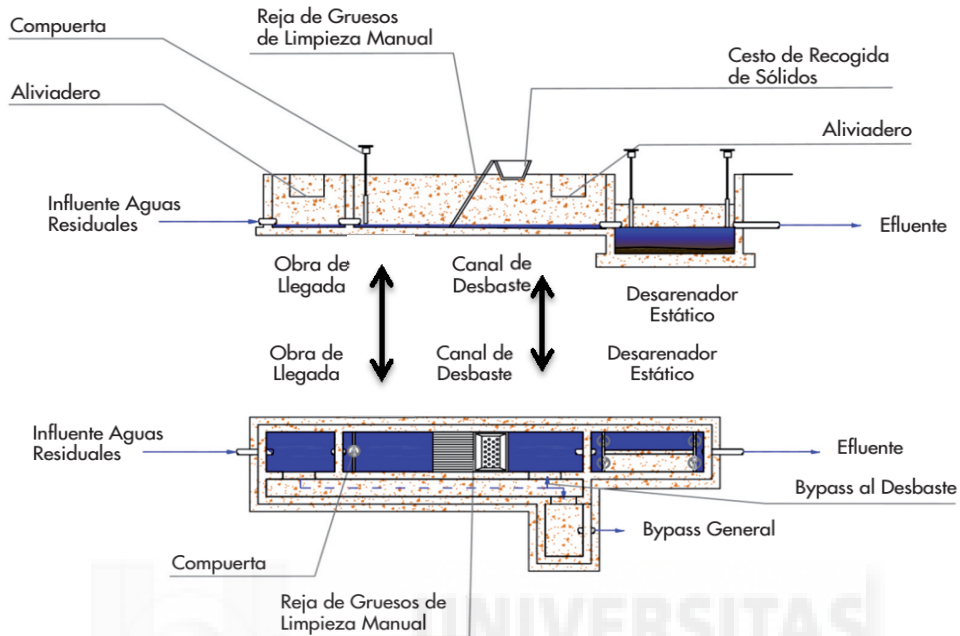


Figura 11: Esquema del pretratamiento elegido (Ortega et al, 2010)

① **Obra de llegada:** sistema imprescindible en todas las estaciones de depuración. Este elemento está orientado a la regulación y control de caudales que entran en el proceso. Consiste en una arqueta que recoge el agua de llegada, dispone de un aliviadero conectado a una línea de bypass general, su función es evacuar el caudal que supere el caudal máximo de diseño. Estructura de gran importancia ya que evita la sobrecarga de caudal en las instalaciones. (García, 2015; Ortega et al, 2010)

El dimensionamiento (Figura 12) se basa en que el agua excedente esté tan diluida que la concentración de los contaminantes será similar a la que tendría si fuese tratada.

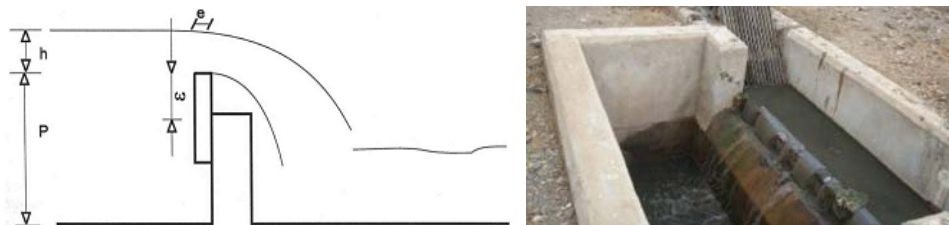


Figura 12: Esquema del aliviadero (Hernández et al, 1995) (Izquierda) e Imagen de un aliviadero latear en bypass (García, 2015) (derecha)

En primer se calcula lugar el caudal de vertido:

$$Q_v = Q_{lluv} - Q_{max, i} \tag{3.1}$$

Dónde:

- Q_v : caudal de vertido que debe evacuar el aliviadero (m^3/s)
- Q_{lluv} : Caudal de lluvia junto con el caudal medio (m^3/s)
- $Q_{max,i}$: Caudal máximo instantáneo (m^3/s)

A continuación se determina la altura de agua en la obra de llegada, tanto para caudal de lluvia como para el caudal instantáneo:

$$P_{max,i} = \frac{Q_{max,i}}{Vel \cdot ancho} \quad (3.2)$$

$$P_{lluv} = \frac{Q_{lluv}}{Vel \cdot ancho} \quad (3.3)$$

$$H = P_{lluv} - P_{max,i} \quad (3.4)$$

Dónde:

- $P_{max,i}$ y P_{lluv} : son las alturas del agua en el canal a caudal máximo instantáneo y a caudal de lluvias respectivamente (m)
- $Q_{max,i}$ y Q_{lluv} : son el caudal máximo instantáneo y el caudal debido a las lluvias respectivamente (m^3/s)
- Vel : velocidad del agua en el canal (m/s)
- $ancho$: ancho del canal (m)
- H : altura necesaria para evacuar el caudal del vertido (m)

A partir de la altura se obtiene el caudal por metro lineal de vertedero requerido: Q_{ml} ($m^3/m \cdot s$):

$$Q_{ml} = 1,83 \cdot (1 - (0,2 \cdot H)) \cdot (H)^{1,5} \quad (3.5)$$

La longitud del vertedero "L" (m) se calcula al dividir el caudal a aliviar entre el caudal por metro lineal.

$$L = \frac{Q_v}{Q_{ml}} \quad (3.6)$$

En la siguiente tabla se recogen los resultados obtenidos:

Tabla 7: Resultados de dimensionado para el aliviadero de entrada

Q_v (m^3/s)	Vel (m/s)	Ancho (m)	P_{max} (m)	P_{lluv} (m)	H (m)	Q_{ml} ($m^3/m \cdot s$)	L (m)
13,29	2,90	1,50	0,92	3,98	3,05	3,80	3,50

2 Canal de desbaste: consiste en la eliminación de sólidos grandes y medianos mediante rejillas (Figura 13). Serán de tipo manual, equipados con una cesta y un rastrillo, debiendo de limpiarse periódicamente. Se instalarán dos canales (mínimo recomendado por las guías de diseño) para permitir el continuo funcionamiento en procesos de mantenimiento y reparación.

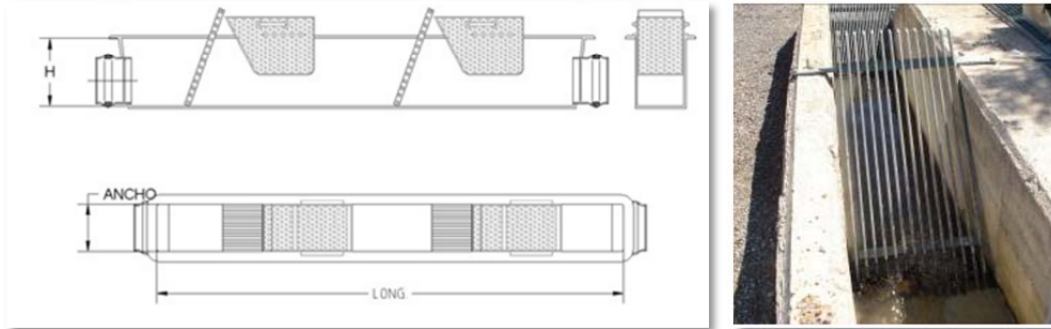


Figura 13: Esquema de un canal de desbaste (Izquierda) e imagen de una reja manual de gruesos seguida de reja de finos (García, 2015)

El canal de desbaste se dimensiona a partir del ancho útil de paso y los valores recomendados de la Tabla 8:

$$Wu = (Ac - n \cdot Ab) \cdot \left(1 - \frac{G}{100}\right) \tag{4.1}$$

Dónde:

- Wu: ancho útil de paso (m)
- Ac: ancho del canal, en función de la obra de llegada (m)
- n: número de barrotes
- Ab: ancho de barrotes (m)
- G: grado de colmatación, valor usual del 30%

Tabla 8: Valores recomendados para el diseño del canal de desbaste y sus respectivas rejillas (García y Corzo, 2008)

Características	Reja de gruesos	Reja de finos
Modo de funcionamiento	Manual	Automático
Anchura de los barrotes (mm)	<12	<6
Luz entre barrotes (mm)	50-100	10-25
Pendiente en relación a la vertical (grados)	20-45	
Velocidad de aproximación (m/s)	0,3-0,6	
Perdida de carga admisible (m)	0,15	0,15

La altura de calado y la longitud del canal se determinan con las siguientes expresiones:

$$h = \frac{Q_{max,d}}{V} \cdot \frac{1}{Wu} \tag{4.2}$$

$$L = Th \cdot V \tag{4.3}$$

Tal que:

- h: altura de calado del agua en el canal (m)
- Qmax,d: Caudal máximo diario (m³/s)

- V: velocidad de aproximación (m/s)
- L: largo del canal (m)
- Th: tiempo de retención (s)

Tabla 9: Resultados obtenidos para el canal de desbaste

Ancho del canal (m)	Nº barrotes	Ancho de barrotes (m)	G (%)	Wu (m)	Vaprox (m^3/s)	Th (s)	h (m)	L (m)
1,50	14	0,012	30	0,93*	0,30	5	2,43*	1,50*

* Se instalan dos canales, dichas dimensiones son por canal

③ **Desarenador estático de flujo horizontal** (Figura 14): tiene como función la eliminación de la mayor parte de la materia más densa presente en el agua, con diámetros superiores a los 2mm, para no saturar el sustrato del humedal artificial.



Figura 14: Desarenador estático de flujo constante (García, 2015)

En este proceso unitario no hay equipos electromecánicos a los que realizar mantenimiento. La superficie se calcula a partir de la velocidad de sedimentación de 1m/min; la longitud del desarenador deberá ser tal que el tiempo en recorrerlo sea suficiente para que sedimente la partícula que esté en la posición más desfavorable de la zona de entrada (Figura 15), se dimensiona a partir de tabla 10 en la que recogen los datos necesarios y mediante las siguientes ecuaciones:

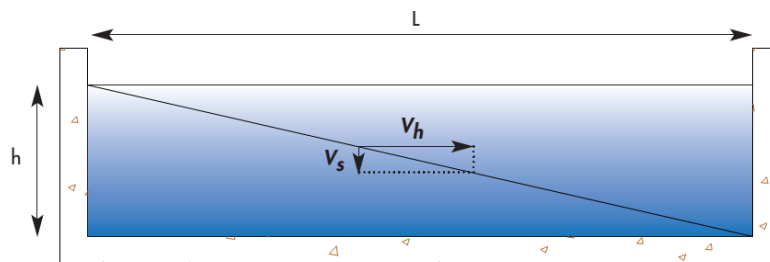


Figura 15 Esquema de la operación del desarenado (Ortega et al, 2010)

$$St = \frac{Q_{max,d}}{Vh} \quad (5.1)$$

$$h = \frac{St}{Wu} \quad (5.2)$$

$$Wu = \frac{L}{\text{relación largo - ancho}} \quad (5.3)$$

$$Cs = \frac{Q_{max}}{L \cdot Wu} \quad (5.4)$$

Dónde:

- St: Sección transversal del canal (m^2)
- Vh: velocidad horizontal del agua (m/s)
- h: altura de calado del canal (m)
- Wu: ancho útil de paso, ancho del canal (m)
- L: largo del desarenador (m)
- Cs: Carga superficial, sirve como método de verificación ($m^3/m^2 \cdot h$)
- Qmax: Caudal máximo (m^3/h)

Tabla 10: Datos necesarios para el dimensionamiento del desarenador:

Parámetro	Valor	
	Intervalo	Valor típico
Carga hidráulica ($m^3/m^2 \cdot h$)		< 70 (a Qmax)
Velocidad horizontal del agua (m/s)	0,2-0,4	0,3
Tiempo de retención (s)	45-90	60
Longitud	20-25 veces la altura de la lámina de agua	
Relación Largo-ancho	1,5-3	2

Tabla 11: Resultado obtenidos para el desarenador

Wu (m)	Vh (m^3/s)	St (m^2)	H (m)	R L-A	L (m)	Cs ($m^3/m^2 \cdot h$)
2,5*	0,40	3,40	0,80*	3/1	15*	65,30**

* Se instalan dos canales, dichas dimensiones son por canal

** Debe ser <70 $m^3/m^2 \cdot h$

4 Desengrasador estático: este proceso tiene como función eliminar las grasas, aceites espumas y aquellos materiales más ligeros que el agua. Se hace pasar el agua a través de un tabique deflector, que obliga a las aguas a salir por la parte inferior del mismo, y los componentes menos densos del agua queden retenidos en la

superficie (Figura 16). Las grasas y demás materiales de baja densidad y flotantes, se retiran manualmente (recogedor de hojas de piscina).

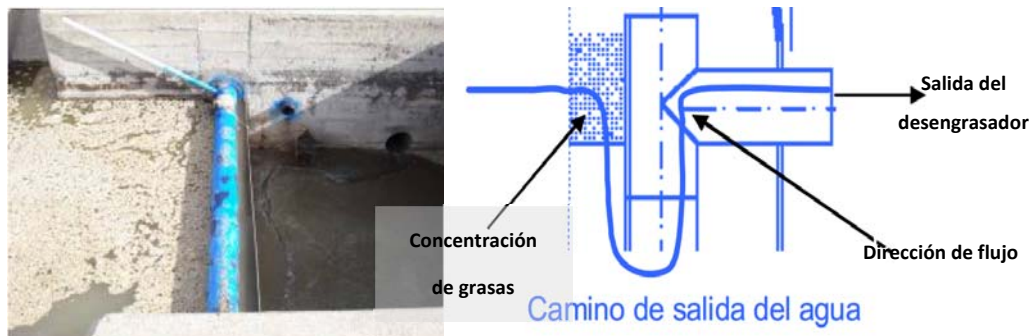


Figura 16: Desengrasador estático, imagen (izquierda) y esquema de funcionamiento (derecha) (García, 2015)

En la siguiente tabla se pueden ver los rendimientos que se pueden obtener en esta fase de depuración:

Tabla 12: Rendimientos de depuración en pretratamiento. Fuente García 2015

Parámetro	% Reducción
Sólidos en suspensión	5-10%
DBO ₅	5-10%
DQO	20-30%
Arenas	90%
Grasas	80%

4.5. Tratamiento primario

En estos casos se opta por instalar una fosa séptica o un tanque imhoff: son dispositivos que permiten un tratamiento primario de las aguas residuales, reduciendo su contenido en sólidos en suspensión, tanto sedimentables como flotantes mediante sedimentación; se acumulan en el fondo en forma de lodos que se van descomponiendo por vía anaeróbica, se pueden distinguir procesos físicos (la acción de la gravedad separa los sólidos sedimentables) y procesos biológicos (descomposición anaerobia)

Este proceso unitario es necesario cuando se dispone de una cantidad de sólidos en suspensión que puedan llegar a colmatarse el humedal, como en nuestro caso. Cabe destacar que las fosas sépticas disponen de varias cámaras para evitar la resuspensión del fango; los tanques imhoff son modificaciones de las fosas sépticas, en estos se da por separado la decantación de la digestión de los fangos, mejorando la sedimentación de los sólidos al evitar que las burbujas de gases de la digestión arrastren partículas.

La elección entre fosa séptica o tanque imhoff (Figura 17) se determina en función del caudal a tratar, si este es menor de 40m³/d se optará por la fosa séptica, en caso contrario el tanque imhoff será el indicado. En nuestro caso, tal como indica la tabla 6 con 34.583 m³/d de caudal a tratar, optamos por un tanque Imhoff.

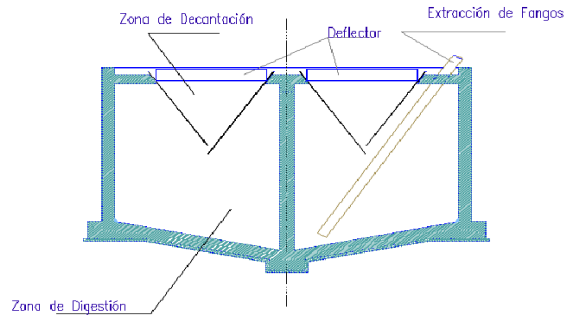


Figura 17: Esquema de la sección de un tanque Imhoff (García et al, 2008)

El tanque Imhoff se dimensiona en función de la superficie necesaria para la decantación:

$$S_{dec} = \frac{Q_{punta, d}}{LH_{punta, d}} \tag{6.1}$$

Siendo sus variables:

- S_{dec}: superficie de la zona de decantación (m²)
- Q_{punta,d}: caudal punta diario (m³/d)
- LH_{punta,d}: Carga hidráulica superficial punta diaria (m³/m² · d)

Tabla 13: Valores recomendados para el dimensionado de un tanque Imhoff

Parámetro	Unidades	Rango	Valor usual
Zona de decantación			
Carga hidráulica superficial punta diaria	m ³ /m ² · d	24-40	32
Tiempo de retención a Q _{med}	h	2-4	3
Tiempo de retención a Q _{punta} horario	h	-	1
Velocidad horizontal punta horaria	m/min	-	<0,3
Relación longitud/ancho	-	2/1-5/1	3/1
Pendiente de la cámara de decantación	-	1,25:1,0-1,75:1,0	1,5:1,0
Obertura inferior	m	0,15-0,3	0,25
Pestaña inferior	m	0,15-0,3	0,25
Deflector debajo de la superficie	m	0,25-0,4	0,3
Deflector encima de la superficie	m	0,3	0,3
Resguardo	m	0,45-0,6	0,6
Zona de escape de gases			
Área (% de la superficie total)	%	15-30	20
Anchura	m	0,45-0,75	0,6
Zona de digestión			
Tiempo de digestión	años	0,5-1,5	1,0
Tasa de emisión unitaria de lodos	L / hab · año	100-200	140
Tubería de extracción de lodos	m	0,2-0,3	0,25
Distancia libre hasta el nivel de lodo	m	0,3-0,9	0,60
Profundidad total del agua en el tanque	m	7-9	9

A partir de la anterior tabla y la superficie necesaria, se determinan el largo (L), ancho (W) y las distintas dimensiones del tanque (Figura 18):

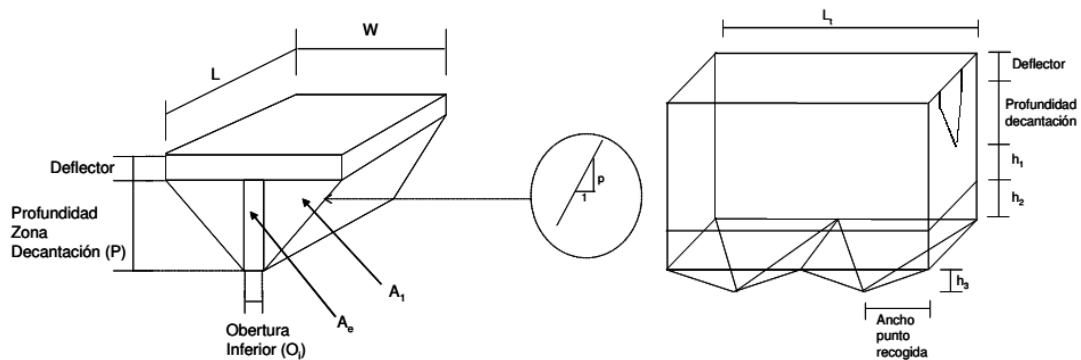


Figura 18: Esquema de la zona de decantación de un tanque Imhoff rectangular (Ortega et al, 2010)

$$P = \left(\frac{W_{dec} - O_i}{2} \right) \cdot p \quad (6.2)$$

$$A_1 = \left(\frac{W_{dec} - O_i}{2} \right) \cdot \left(\frac{P}{2} \right) \quad (6.3)$$

$$A_e = O_i \cdot P \quad (6.4)$$

$$A_t = 2 \cdot A_1 + A_e \quad (6.5)$$

Dónde:

- P: profundidad de la zona de decantación (m)
- p: pendiente de la zona de decantación (m/m)
- W_{dec} : ancho del tanque de la zona de decantación (m)
- O_i : longitud de la obertura inferior (m)
- A_1 , A_e y A_t : superficie del triángulo, rectángulo y total, respectivamente (m^2)

A continuación se calcula el volumen de decantación y se realizan algunas comprobaciones:

$$V_{dec} = (h_{deflec} \cdot S_{dec}) + (A_t \cdot L) \quad (6.6)$$

$$V_{punta,h} = \frac{Q_{punta,h}}{A_t \cdot 60} < 0,3 \quad (6.7)$$

$$2h < Th = \frac{V_{dec} \cdot 24}{Q_{med,d}} < 4h \quad (6.8)$$

Y para determinar los datos totales del tanque:

$$S_t = (1 + \%S_{gas}) \cdot S_{dec} \quad (6.9)$$

$$W_t = W_{dec} + W_{gas} \quad (6.10)$$

$$L_t = \frac{S_t}{W_t} \quad (6.11)$$

Tal que:

- Vdec: Volumen de la zona de decantación (m^3)
- hdeflec: altura de la zona sumergida del deflector (m)
- Sdec: superficie de la zona de decantación (m^2)
- At: Superficie total (m^2)
- L: largo del canal (m)
- Vpuntah: velocidad horizontal punta horaria (m/min)
- Th: tiempo de retención medio (h)
- St: superficie total del tanque (m^2)
- %Sgas: porcentaje de la superficie de la zona de escape de gas respecto de la superficie total
- Wt, Wdec y Wgas: ancho total, de la zona de decantación y de la zona de gases respectivamente (m)
- Lt: longitud total del tanque (m)

Para determinar la altura total del tanque es necesario determinar los siguientes parámetros:

$$V_{lodos} = \frac{VEU \cdot Td \cdot N}{1000} \quad (6.12)$$

$$h_3 = \left(\frac{Lt}{n} \right) \cdot tg\alpha \quad (6.13)$$

$$h_2 = \frac{V_{lodos} - \left(\frac{1}{3} \cdot Lt \cdot Wt \cdot h_3 \right)}{Lt \cdot Wt} \quad (6.14)$$

$$ht = h_{resg} + h_{deflec} + P + h_1 + h_2 + h_3 \quad (6.15)$$

$$V_{tot} = V_{resg} + V_{dec} + V_{lodos} + (h_1 \cdot Lt \cdot Wt) \quad (6.16)$$

Dónde:

- Vlodos: volumen ocupado por los lodos (m^3)
- VEU: velocidad de emisión unitaria de lodos ($L/hab \cdot año$)
- Td: tiempo de digestión (años)
- N: número de habitantes
- h3: altura del fondo piramidal (m)
- n: número de puntos de recogida de lodos
- α : inclinación de las paredes del fondo
- h2: altura ocupada por los lodos (m)
- hresg (m) y Vresg (m^3) corresponden a la profundidad y al volumen del resguardo respectivamente
- ht: profundidad total del tanque (m)
- Vtot: volumen total del tanque (m^3)

Mediante una estimación previa, para poder cumplir con las velocidades punta y los tiempos de retención mínimos se establece como mínimo el uso de dos unidades. A continuación se muestran los datos de diseño por unidad.

Tabla 14: Resumen de datos y resultados para el tratamiento primario

Datos empleados

LH_{punta} ($m^3/m^2 \cdot d$)	R L-A	P (m/m)	O_i (m)	h_{deflec} (m)	Gas (%)	VEU ($L/hab \cdot año$)	W_{gas} (m)	T_{dig} ($años$)	N	h_{res} (m)
32	4/1	1,55	0,30	0,25	20	100	0,60	1	2882	0,60

Resultados

S_{dec} (m^2)	L (m)	W_{dec} (m)	$P_{profund}$ (m)	A_1 (m^2)
918,60	60,62	15,15	11,51	42,75
A_e (m^2)	A_t (m^2)	V_{dec} (m^3)	h3 (m)	h2 (m)
3,45	88,95	5621,83	0,61	0,07
V_{resg} (m^3)	V_{tot} (m^3)	h_{tot} (m)	h1 (m)	α
633,84	7178	13,04	0,60	50
$V_{punta,h}$ (m/min)	Th (h)	S_t (m^2)	W_t (m)	L_t (m)
0,21*	3,90**	1102,32	15,75	70,00

* $V_{punta,h} < 0,3$

** $2h < t_h < 4h$

A continuación se muestra una tabla con los rendimientos que se pueden obtener con este tipo de tratamientos primarios:

Tabla 15: rendimientos de depuración en el tratamiento primario. Fuente García 2015

Parámetro	% Reducción
Sólidos en suspensión	50-60
DBO ₅	20-30
DQO	20-30

4.6. Tratamiento secundario

Como tratamiento secundario se ha escogido un sistema híbrido compuesto por un humedal de flujo subsuperficial, seguido de un humedal de flujo superficial propiciando la nitrificación en el primero y la desnitrificación en el segundo.

En los cálculos para el dimensionamiento se tiene en consideración que todos los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su funcionamiento se puede aproximar al de un reactor de flujo a pistón con cinética de primer orden (Andreo, 2014). En la tabla 16 se muestran los valores necesarios para el dimensionamiento del humedal con los datos analíticos de la composición de las aguas a tratar.

Tabla 16 Datos necesarios para el dimensionamiento de humedales artificiales

Parámetro	Entrada al sistema	Pretratamiento		Tratamiento 1º		Tratamiento 2º
		% reducción	[] salida	% reducción	[] salida	Entrada
DBO_5 (mg/L)	≈5	5	4,75	20	3,8	3,8
DQO (mg/L)	117,80	20	94,24	20	75,39	75,39
NO_3^- (mg/L)	20,20	-	-	-	-	20,20
NH_4^+ (mg/L)	1,10	-	-	-	-	1,10
SST (mg/L)	33,20	5	31,54	50	15,77	15,77
Caudal medio (m^3/d)	34.583					
T ($^{\circ}C$)	18,60					
pH	8,00					
CE (mS/cm)	18,40					

Como se ha nombrado antes en el apartado 3 “Fundamento del dimensionado del humedal”, el diseño y dimensionado se realiza en dos fases principales: primero se determina la superficie necesaria de tratamiento (diseño biológico) y en la segunda se establecen las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico); pero antes de ambas se ha de determinar las características del sustrato (Tabla 17). El sustrato y sus características van a influir en el dimensionamiento tanto biológico como hidráulico.

Tabla 17: Valores de porosidad y conductividad hidráulica para distintos tipos de sustratos. Datos a partir de las Fuentes García y Corzo, 2008 e Idris et al, 2010

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo d10 (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica ($m^3/m^2 \cdot d$)	Porosidad (η)
Arenas graduadas	2	28-32	100-1000	0,300
Arenas gravosas	8	30-35	500-5000	0,325
Gravas finas	16	35-38	1000-10000	0,365
Gravas medianas	32	36-40	10000-50000	0,380
Rocas pequeñas	128	38-45	50000-250000	0,415

Debido al uso de tratamientos previos, se espera un agua poco cargada de sedimentos, y dada la necesidad de tratar una gran cantidad de caudal se opta por usar un tipo de rocas pequeñas con porosidad entorno a los 0,75 η y una conductividad hidráulica de 150000-250000 ($m^3/m^2 \cdot d$). Con este tipo de sustrato Idris et al, 2010 ha obtenido buenos resultados.

Para el proceso de nitrificación, se establecen los siguientes supuestos (Idris et al, 2010; Andreo, 2014):

- Todo el nitrógeno orgánico que entra en el sistema se convierte en nitrógeno amoniacal.
- La remoción se debe su totalidad a la nitrificación.
- En cuanto a la desnitrificación se relaciona el nitrato en el afluente del primer humedal con el deseado a la salida.

En este caso debido a los dudosos datos obtenidos para la DBO, se empleará la DQO en función, no se obtendrán con ellos dimensiones pero si se estimará la cinética de remoción de la materia orgánica.

4.6.1. Humedal de flujo subsuperficial

4.6.1.1. Diseño biológico

La superficie del humedal se determina a partir de la ecuación 1.5 y 1.6 (resultados del diseño biológico, en la tabla 19,20 y 21), que aplicadas a la nitrificación queda tal que:

$$\ln\left(\frac{NH_4^+ aff}{NH_4^+ ef}\right) = \frac{S \cdot Kt \cdot (Dm \cdot n + Dw)}{Q_{med, d}} \quad (7.1)$$

Cabe destacar que en los humedales superficiales la altura de la lámina de agua es nula ($Dw=0$)

Las expresiones de remoción de contaminantes son similares para los diferentes tipos de humedales, así como las diferentes constantes de remoción:

Tabla 18: Coeficientes de temperatura y constantes de reacción a la temperatura de 20°C, para humedales de flujo superficial y subsuperficial (Idris et al, 2010)

Tipo de humedal	Contaminante a eliminar	Temperatura de referencia (°C)	Constante de velocidad (d^{-1})	Coefficiente de temperatura (θ)
H. Flujo Superficial	DBO	20	0,678	1,06
	NH_4^+ Nitrificación	20	0,2187	1,048
	NO_3^- Desnitrificación	20	1,000	1,15
H. Flujo Subsuperficial	DBO	20	1,104	1,06
	NH_4^+ Nitrificación	20	N_{NH}^*	1,048
	NO_3^- Desnitrificación	20	1,000	1,15

$$N_{NH}^* = 0,001854 + 0,3922(rz)^{2,6077}$$

Donde rz: % suelo ocupado por raíces

Quedando la ecuación para la nitrificación en el humedal artificial subsuperficial horizontal tal que:

$$\ln\left(\frac{NH_4^+ aff}{NH_4^+ eff}\right) = \frac{S \cdot (0,01854 + 0,3922 (rz)^{2,6077}) \cdot (1,048)^{(T-20)} \cdot (Dm \cdot n)}{Q_{med, d}}$$

Tabla 19: Resultados del diseño biológico del primer humedal. Nitrificación

$NH_4^+ aff$ (mg/L)	$NH_4^+ eff$ (mg/L)	rz (%)	T ($^{\circ}C$)	z (m)	n	Dw (m)	S (m^2)
1,1	1,04	80	18,6	1,20	0,80	0	8.647

En este humedal también se producen condiciones anaerobias (en zonas no cubiertas por las raíces). A partir de la superficie necesaria en el primer humedal y aplicando la ecuación 1.5 se determina la remoción de DQO y de NO_3^- en el primer humedal. Obteniendo los siguientes resultados (Tabla 20):

Tabla 20: Resultados remoción de DBO y NO_3^- en el primer humedal.

S (m^2)	Dw (m)	T ($^{\circ}C$)	Dm (m)	n
1807	0	18,6	1,20	0,8
$DQO_{entrada}$ (mg/L)	DQO_{salida} (mg/L)	$NO_3^- aff$ (mg/L)	$NO_3^- eff$ (mg/L)	
75,39	58,59	20,20	16,48	

Para la eliminación de sólidos en suspensión en humedales subsuperficiales se emplea la fórmula propuesta por Idris en 2010 y la ecuación 1.7 que determina la Tasa de Carga Hidráulica:

$$HLR = \frac{Q_{med, d}}{S} \quad (1.7)$$

$$SSe = SSo \cdot [(0,1058 + 0,0011) \cdot HLR] \quad (7.2)$$

Tabla 21: Remoción de sólidos en suspensión en el primer humedal

SSo (mg/L)	HLR (mg/L)	SSe (mg/L)
15,77	4,00	6,74

Dónde:

- HLR: tasa de carga hidráulica (m/d)
- SSe: sólidos en suspensión en el efluente (mg/L)
- SSo: sólidos en suspensión en el agua a tratar (mg/L)

4.6.1.2. Diseño hidráulico

A continuación se calculan las dimensiones del primer humedal (tabla 22); es necesario determinar en primer lugar la sección transversal y a partir de ésta, la longitud y el ancho:

$$S_t = \frac{Q_{max,d}}{(Ks/5) \cdot s} \quad (1.9)$$

$$W = \frac{S_t}{h} \quad (1.10)$$

$$L = \frac{A}{W} \quad (1.11)$$

Tabla 22: Resultados del diseño hidráulico del primer humedal.

$Q_{m\acute{a}x,d}$ (m^2/d)	Ks ($m^3/m^2 \cdot d$)	s (m/m)	S_t (m^2)	h (m)	W (m)	L (m)
117.581	250.000	0,02	117,58	1,20	97,98	88,25

4.6.2. Humedal de flujo superficial

4.6.2.1. Diseño biológico

Para este caso los datos de entrada corresponden con los obtenidos para la salida del primer humedal. La superficie del humedal de flujo libre o superficial se calcula en función de la necesidad de superficie para desnitrificar el agua procedente del primer humedal (resultados del diseño biológico, en la tabla 23, 24 y 25); así empleando la ecuación 1.5 para este fin:

$$\ln\left(\frac{NO_{3\ inf}}{NO_{3\ eff}}\right) = \frac{S \cdot Kt \cdot (Dm \cdot n + Dw)}{Q_{med,d}} \quad (7.3)$$

Sustituyendo los valores de la tabla 18 en la ecuación 7.3, obtenemos la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{NO_{3\ aff1}}{NO_{3\ eff}}\right) = \frac{S \cdot (1,00) \cdot (1,15)^{(T-20)} \cdot (Dm \cdot n + Dw)}{Q_{med,d}}$$

Dónde $NO_{3\ aff1}$ es el resultado de nitrato a la salida del primer humedal sumado al amonio nitrificado ($NH_4^+_{eff} - NH_4^+_{aff}$).

Tabla 23: Resultados del diseño biológico del segundo humedal. Desnitrificación

$NO_3^-_{aff1}$ (mg/L)	$NO_3^-_{eff}$ (mg/L)	T (°C)	Dm (m)	n	Dw (m)	S (m^2)
1,1	1,04	18,6	1,20	0,80	2	16.814

A partir de la superficie necesaria en el segundo humedal y con la ecuación 1.5 se determina la remoción de DQO y la nitrificación en la superficie de este humedal; por lo tanto a la salida del sistema de depuración.

Tabla 24: Resultados de la DBO y el NH_4^+ a la salida del segundo humedal

S (m^2)	Dw (m)	T (°C)	Dm (m)	n
16.814	2	18,6	1,20	0,8
DQOentrada* (mg/L)	DQOsalida (mg/L)	$NH_4^+_{aff1}$ (mg/L)	$NH_4^+_{eff2}$ (mg/L)	
58,59	23,61	1,04	0,78	

*DQOentrada corresponde con la DQO de salida del primer humedal

Para la eliminación de sólidos en suspensión en humedales superficiales se emplea la fórmula propuesta por Idris (2010)

$$SSe = SSo \cdot [(0,1139 + 0,00213) \cdot HLR] \quad (7.4)$$

Dónde:

- HLR: tasa de carga hidráulica (m/d)
- SSe: sólidos en suspensión en el efluente (mg/L)
- SSo: sólidos en suspensión en el agua a tratar (mg/L)

Tabla 25: Remoción de sólidos en suspensión en el segundo humedal

SSo (mg/L)	HLR (mg/L)	SSe (mg/L)
6,74*	2,06	1,61

*SSo: sólidos en suspensión a tratar son los disponibles a la salida del primer humedal

4.6.2.2. Diseño hidráulico

A continuación se calculan las dimensiones del segundo humedal (tabla 26) tal y cómo se ha hecho para el primero; es necesario determinar en primer lugar la sección transversal y a partir de ésta, la longitud y el ancho:

$$S_t = \frac{Q_{max,d}}{(Ks/5) \cdot s} \quad (1.9)$$

$$W = \frac{S_t}{h} \quad (1.10)$$

$$L = \frac{S}{W} \quad (1.11)$$

Tabla 26: Resultados del diseño hidráulico del segundo humedal.

Q _{máx,d} (m^2/d)	Ks ($m^3/m^2 \cdot d$)	s (m/m)	St (m^2)	h (m)	W (m)	L (m)
117.581	250.000	0,02	117,58	3,20	36,74	457,60

4.7. Discusión

Las plantas tienen influencia notable sólo si tratan con bajas cargas, como en nuestro caso, esto las hace útiles para nuestro sistema; las zonas aeróbicas se producen sólo alrededor de las raíces y rizomas (el resto son zonas saturadas y anaeróbicas). Se necesitan 4,6mg de oxígeno para oxidar 1mg de n-amoniaco. Por otro lado se han obtenido resultados de transferencia de oxígeno por *Phragmites australis* de hasta 20g O_2/m^2 (Valor recomendable de 12g O_2/m^2) (Andreo et al, 2014). Cabe destacar que el intervalo de pH óptimo está entre 7,5-8,6, dentro del cual nos encontramos.

Esto haría que en el primer humedal (Tabla 26) con una superficie necesaria de 8.647 m^2 se obtuviera una transferencia de oxígeno de 103.764 g O_2 . Con este valor teórico sería capaz de oxidar 22.557 mg de n-amoniaco, más que suficiente para la nitrificación deseada en el primer humedal.

En el segundo humedal (de flujo superficial) la principal fuente de oxigenación vendría por parte del viento y su reaeración superficial, este proceso se ve mermado cuando la vegetación posee una alta densidad; en este tipo de humedal la aportación de oxígeno por las propias plantas acuáticas tiene una menor importancia, dado que la zona dónde éstas liberan el oxígeno (rizomas y raíces) se encuentran dentro del propio sustrato, debajo de la columna de agua, y por lo tanto todo el oxígeno aportado se consume por los sedimentos presentes en el fondo del humedal (García et al, 2015).

Tabla 26: Resumen de los resultados obtenidos

Parámetro	Entrada al sistema	Pretratamiento		Tratamiento 1º		Tratamiento 2º		[] en el río
		% reducción	[] salida	% reducción	[] salida	[] salida requeridas	[] salida teóricas	
DBO ₅ (mg/L)	≈5*	5	4,75	20	3,8	≤6		
DQO (mg/L)	117,80	20	94,24	20	75,39		23,61	85,57
NO ₃ ⁻ (mg/L)	20,20	-	-	-	-	≤5	5,00	15
NH ₄ ⁺ (mg/L)	1,10	-	-	-	-	≤1,00	0,78	0,98
SST (mg/L)	33,20	5	31,54	50	15,77	≤25	1,61	10,93
Área necesaria (m^2)		71,85		2.112		25.462		
Caudal medio (m^3/d)	34.583	<i>Algunos resultados como Tº, CE y pH, se estima que no se ven afectados por el humedal en los datos teóricos, pero en la práctica estos se ven levemente reducidos. Al igual ocurre con el caudal, este se verá disminuido por la evapotranspiración (tabla 4), pero dicho efecto no es considerado cuando el caudal se va a reutilizar (caudal ecológico)</i>						
T (°C)	18,60							
pH	8,00							
CE (mS/cm)	18,4							

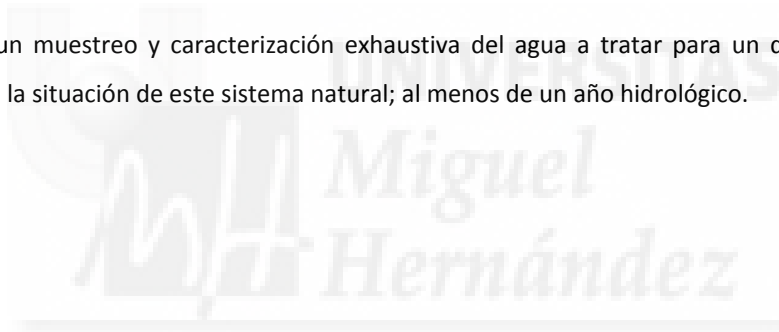
*A partir de la Directiva 2006/44/CE que indica la calidad necesaria de aguas continentales para ser aptas para la vida de los peces y el Real Decreto 1620/2007 que establece valores de reutilización de las aguas para fines ambientales, se establecen los siguientes parámetros: 1) $SST \leq 25 \text{ mg/L}$; 2) $NH_4^+ \leq 1,0 \text{ mg/L}$; 3) $NO_3^- \leq 15 \text{ mg/L}$

5. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones alcanzadas durante el presente trabajo:

- Los humedales artificiales son tratamientos de operación simple con bajo mantenimiento y coste; con escasos residuos de operación. Cabe destacar la gran extensión de terreno como inconveniente principal.
- La hidrología de los humedales es de flujo lento, esto proporciona altos tiempos de contacto entre sustrato, agua y superficies del humedal.

- El éxito del tratamiento se limita al tipo de configuración aplicada, la hidráulica del sistema y características del efluente; es necesario un buen diseño.
- Estos sistemas son capaces de eliminar gran cantidad y variedad de contaminantes, por ejemplo entre 60-80% del nitrógeno total presente (en nuestro caso un 72%)
- Se evaluó la posibilidad de mejorar la calidad de aguas y cauces naturales con sistemas de tratamientos no convencionales, en concreto con un sistema de humedales híbridos
- El sistema está compuesto por un pretratamiento (con aliviadero, canal de desbaste con rejillas de limpieza manual, desarenador estático y desengrasador), tanque Imhoff a modo de tratamiento primario y un sistema híbrido compuesto por un humedal de flujo subsuperficial seguido de un humedal de flujo superficial, ambos plantados con *Phragmites australis*.
- Los parámetros evaluados fueron: Tª, pH, CE, DBO5, DQO, NO_3^- , NH_4^+ , SST. Las aguas presentaron un carácter medio-débil, menos de lo esperado, siendo el factor limitante el nitrógeno, por ello se dimensionó el humedal en función de este parámetro
- Un buen mantenimiento del pretratamiento asegura el correcto funcionamiento. Evita la colmatación y alarga la vida útil (>20 años)
- Es necesario un muestreo y caracterización exhaustiva del agua a tratar para un dimensionado que se ajuste mejor a la situación de este sistema natural; al menos de un año hidrológico.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Andreo, P. (2014). *Evaluación y Diseño de un Humedal Construido para la Depuración de Aguas Residuales Domésticas*. Tesis doctoral. Universidad de Murcia: Murcia (España)
- Beteta, A. (2011). *E.D.A.R. para una población de más de 100.000 habitantes equivalentes*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña: Barcelona, España.
- CHJ (2015). Confederación Hidrográfica del Júcar. Web institucional. Último acceso: Junio 2015. URL: http://www.chj.es/es-es/medioambiente/Paginas/Medio_ambiente.aspx
- Cooper, PF., Boon, A. (1987). The use of Phragmites for wastewater treatment by the Root Zone Method: The UK approach. En: Reddy, KR., Smith, WH. (Eds) *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*. Magnolia Publishing: Orlando (FL), USA. pp. 27-48.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de las aguas, la Directiva Marco del Agua.
- Directiva 2006/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 6 de septiembre de 2006, relativa a la calidad de las aguas continentales que requieren protección o mejora para ser aptas para la vida de los peces
- Duque, A., Guillermo, J. (2014). *Evaluación de la Eficiencia de Un Sistema Piloto de Humedales Híbridos Como Post-Tratamiento de Aguas Residuales en Una Porcícola*. Tesis Doctoral. Universidad Tecnológica de Pereira: Pereira, Colombia.
- FAO (2006.) *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje 56*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: Roma, Italia.
- García, FJ. (2015). *Sistemas extensivos de depuración: humedales artificiales, filtros intermitentes de arena, filtros de turba, lagunajes y combinación de tecnologías* (modalidad online) Curso de especialista universitario en depuración de aguas residuales en pequeños núcleos, Universidad de Almería.
- García, J., Corzo, A. (2008). *Depuración con Humedales Construidos, Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya: Barcelona, España
- González, O. (2011). Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 32(1): 61-77
- Hernández, A., Hernández, A., Galán, P. (1995). *Manual de Depuración Uralita. Sistemas de depuración de aguas residuales en núcleos de hasta 20.000 habitantes*. Editorial Paraninfo: Madrid, España
- Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., von Muenche, E. (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface Flow Constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development, Alemania.
- Idris, A., Ghani, A., Yung-Tse, H., K.Wang, L. (2010). Chapter 10. Wetlands for Wastewater Treatment. En: Wang, LK, Tay, J-H, Tay, STL., Hung, Y-T. (Eds.) *Handbook of Environmental Engineering, Volume 11: Environmental Bioengineering*. Springer Science + Business Media: Heidelberg, Alemania. pp. 317-350.

- Kadlec, RH, Knight, RL, Vymazal J, Brix H, Cooper, P., Haberl, R. (2000). *Constructed wetlands for pollution control. Scientific and Technical Report 8*. IWA Publishing: London, Reino Unido.
- Kadlec, R., Wallace, S. (2009). *Treatment wetlands, Second edition*. CRC Press: Boca Raton (FL), USA
- Kirschner, AKT, Riegl, B, Velimirov, B. (2001). Degradation of emergent and submerged macrophytes in an oxbow lake of an embanked backwater system: Implications for the terrestrialization process. *International Review of Hydrobiology*, 86: 555-571.
- Li, L, Li, Y, Kumar, D, Nian, Y, Jiang, G. (2007). Potential of Constructed wetlands in treating the eutrophic water: Evidence from Taihu Lake of China. *Bioresource Technology*, 99: 1656-1663.
- Martín, M, Oliver, N, Hernández-Crespo, C, Gargallo, S., Regidor, MC. (2012). The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of lake L'Albufera de Valencia (Spain). *Ecological Engineering*, 50: 52-61.
- Ortega, E, Ferrer, Y, Salas, JJ, Aragón, C, Real, A. (2010). *Manual para la implementación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino: Madrid, España.
- Pérez, G., Enciso, S., Del Prado, M., Castañon, JH. (2006). *Diseño Hidráulico de un Humedal Artificial a Nivel de Laboratorio*. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez: Tuxtla Gutiérrez, México.
- Plaza de los Reyes, C., Vera, L., Salvato, M., Borin, M., Vidal, G. (2011). *Consideraciones para la eliminación del nitrógeno en los humedales*. Universidad de Concepción (Chile) y Università degli Studi di Padova (Italia)
- Puigagut, J, Villaseñor, J, Salas, JJ, Bécares, E, García, J. (2007). Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: a comparative study. *Ecological Engineering*, 30: 312-319.
- Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas
- Rodrigo, MA., Martín, M., Rojo, C., Gargallo, S., Segura, M., Oliver, N. (2013). The role of eutrophication reduction of two small man-made Mediterranean lagoons in the context of a broader remediation system: Effects on water quality and plankton contribution (Valencia). *Ecological Engineering*, 61: 371-382.
- Schlesinger, WH., Bernhardt, ES. (2013). *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change (Third Edition)*. Academic Press: Oxford, Reino Unido.
- Today Online (2015) Imagen lago Taihu Último acceso: Junio 2015. URL: <http://www.todayonline.com/photos/gallery-after-chinas-multibillion-dollar-cleanup-water-still-unfit-drink>
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years of experience. *Ecological Engineering*, 18: 633-646.
- Vymazal, J. (2011). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental Sciences & Technology*, 45: 61-69.
- Water for Life Decade (2014). Decenio Internacional para la Acción "El agua, fuente de vida" 2005-2015. United Nations. Último acceso: Junio 2015. URL: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>