

MANUAL DE TECNOLOGÍAS NO CONVENCIONALES PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES



Obra realizada por el CENTA gracias a una subvención concedida por la Agencia Andaluza del Agua de la Consejería de Medio Ambiente y cofinanciada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional

Dirección facultativa: Instituto del Agua de Andalucía

Autores:

Juan José Salas Rodríguez

Juan Ramón Pidre Bocado

Luciana Sánchez Fernández

Textos y fotografías: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA)

Diseño y maquetación: www.aspectocomunicacion.com

Impresión y Encuadernación: Coria Gráfica

Depósito Legal: SE-2066-07

ISBN 13: 978-84-611-6885-9

ÍNDICE GENERAL

Capítulo I.- Generalidades

Capítulo II.- Aplicación al terreno

Capítulo III.- Lagunaje

Capítulo IV.- Humedales Artificiales

Capítulo V.- Filtros de Turba



Fuensanta Coves
Consejera de Medio Ambiente
Junta de Andalucía

El constante crecimiento demográfico, concentrado en las ciudades, trae consigo la aparición de necesidades y demandas a las administraciones públicas. El deterioro del medio ambiente puede tener muchas procedencias, y uno fundamental es un mal modelo de gestión de los recursos, entre ellos el agua. Hoy en día, una gestión del agua basada en la oferta ya no tiene cabida, por lo que debemos hacer una redefinición del concepto en pro de una gestión más eficaz y equitativa, más respetuosa con la diversidad de nuestros ecosistemas y, sobre todo, más participativa.

La Comunidad Autónoma dispone en estos momentos de una buena cobertura en infraestructuras en materia de saneamiento y depuración. No obstante, existen desequilibrios importantes, que surgen de las características propias del territorio, entre las

grandes ciudades, y las medianas y pequeñas poblaciones que es preciso resolver. Se requieren soluciones imaginativas que logren igualar las condiciones de los servicios en toda la región.

Dadas las directrices de la UE, la Junta de Andalucía trabaja en incorporar las premisas europeas, adaptadas a las características propias del territorio andaluz.

La premisa es una renovada visión de la gestión pública del agua como integrante de un mismo ecosistema. De esta forma, no sólo se implantará un nuevo modelo, sino que se prevé un mayor reparto de competencias entre las administraciones y entidades responsables y se promueve el consumo responsable mediante un sistema de fiscalidad ecológica, teniendo siempre en cuenta que el agua nos afecta a todos por igual. El objetivo es eliminar

esos desequilibrios existentes y a garantizar la prestación de servicios de calidad a todos los ciudadanos y ciudadanas.

En este panorama, la investigación juega un papel muy importante, especialmente en lo referente a la integración del ciclo urbano del agua dentro del ciclo hidrológico natural. El conocimiento, la gestión integral y eficiente, y un consumo responsable, son las claves para lograr un desarrollo sostenible que permita mejorar la calidad de vida de la población respetando la diversidad de nuestros ecosistemas.

Fiel reflejo de la importancia de la investigación es este Manual de tecnologías no convencionales, que recoge en sus páginas el resultado de veinte años de investigación en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes, y que se presenta como referente dentro del sector científico-técnico. El desarrollo y aplicación de las denominadas tecnologías no convencionales favorecen la implantación de sistemas de depuración más respetuosos con el medio ambiente así como la gestión eficaz de los recursos, dadas las características propias de estas técnicas.

En definitiva, la ciencia aplicada a hacer compatibles las exigencias del desarrollo con la protección del medio ambiente.



Hermelindo Castro Nogueira
Presidente CENTA

El saneamiento y la depuración de las aguas residuales ha sido una preocupación constante por parte de las autoridades competentes a lo largo de los últimos años. Pero cuando nos referimos a pequeñas colectividades, este problema adquiere un matiz diferente, ya que se tiene que hacer frente a una serie de obstáculos que no se dan en otros contextos.

Para proveer de servicios de agua y saneamiento sostenibles a las pequeñas localidades no existe una sola tecnología ni una sola solución. Toda solución debe ser adaptada al entorno ambiental, social y económico de cada caso, especialmente en lo que respecta a las localidades de pequeño tamaño.

Las denominadas Tecnologías no Convencionales (TNC) presentan una serie de singularidades que las

hacen especialmente adaptables a las características de las poblaciones medianas y pequeñas: presentan una gran versatilidad y adaptabilidad, elevada integración en el entorno natural y unos costes de implantación y explotación muy por debajo de los estimados en los tratamientos de las aguas residuales urbanas procedentes de grandes poblaciones, donde las carencias de espacio y las elevadas exigencias en la depuración hacen insustituibles las llamadas tecnologías convencionales.

La Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) forma parte de una estrategia de I+D+I en materia de depuración de aguas residuales, especialmente enfocada al estudio de las TNC, que se viene desarrollando desde hace casi 20 años en Andalucía y cuya característica más destacable es la de conjugar los trabajos puramente científicos y

de investigación con un extenso conocimiento de la depuración sobre la realidad del territorio.

Desde su puesta en marcha, la PECC ha sido una experiencia pionera y un referente tanto a nivel nacional como internacional. Los trabajos desarrollados en el entorno de esta planta no sólo han servido para mejorar nuestros conocimientos en esta materia sino que, además, han permitido la difusión y la divulgación de los mismos y el traslado de nuestra experiencia a otros territorios, como Marruecos y Latinoamérica.

Las páginas de este documento recogen los resultados de todo este esfuerzo desarrollado a la largo de casi veinte años de experiencia. En este sentido, podemos decir que estamos ante una publicación pionera ya que, en la actualidad, no existe un Manual Técnico sobre Tecnologías no Convencionales, tan específico y que abarque un periodo tan largo de análisis y una diversidad tan amplia de tecnologías.

Esta publicación se compone de cinco monográficos cada uno de los cuales presenta todos los conocimientos adquiridos, tanto a nivel de estudios de I+D+I en la PECC, como a nivel de análisis en el terreno, acerca de una tecnología concreta: lagunajes, humedales artificiales, filtros de turba y procesos de película fija, estando reservado el primero de los monográficos a las singularidades de la depuración en pequeñas colectividades.

Durante estas dos décadas de análisis y estudio, son muchos los técnicos que han aportado su trabajo en esta investigación experimental. Por todo ello, no quiero perder la oportunidad de agradecer el gran esfuerzo y la ilusión que el equipo humano de la PECC ha puesto en este proyecto.

La edición de este Manual no significa el fin de la investigación que se lleva a cabo en la planta, sino el final de una etapa que se cierra con las conclusiones que se presentan en estas páginas. La labor continua día a día para que el conocimiento científico siga avanzando y para que las tecnologías no convencionales logren alcanzar el máximo valor y utilidad en el sector, dadas las múltiples ventajas que conllevan, tanto medioambientales como económicas.

CAPÍTULO IV

ÍNDICE

- 1.-INTRODUCCIÓN15
- 2.- FUNDAMENTOS19
- 3.- TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES23
 - 3.1.- Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS)23
 - 3.2.- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSs)25
- 4.- ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO29
 - 4.1.- Humedales Artificiales de Flujo Superficial29
 - 4.2.- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial30
 - 4.2.1.- Pretratamiento30
 - 4.2.2.- Tratamiento Primario31
 - 4.2.3.- Tratamiento Secundario33
 - 4.2.4.- Tratamiento Terciario33
 - 4.3.- Otros esquemas34
- 5.- MECANISMOS DE DEPURACIÓN37
 - 5.1.- Eliminación de sólidos en suspensión.....37
 - 5.2.- Eliminación de materia orgánica.....40
 - 5.3.- Eliminación de nutrientes44
 - 5.4.- Eliminación de metales pesados48
 - 5.5.- Eliminación de organismos patógenos.....48

6.- RENDIMIENTOS DE DEPURACIÓN.....51

6.1.- Humedales Artificiales de Flujo Superficial51

6.2.- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial53

7.- DISEÑO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES55

7.1.- Método de Reed y colaboradores.....55

7.2.- Método de Kadlec y Knight.....58

7.3.- Combinación de HAFSs Verticales sin Tratamiento Primario.....59

8.- CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.....61

8.1.- El confinamiento61

8.2.- La evacuación de los efluentes depurados.....64

8.3.- La ventilación del sustrato filtrante.....68

8.4.- Las capas de áridos69

8.5.- El sistema de reparto de las aguas a tratar.....72

8.6.- La plantación74

**9.- PUESTA EN SERVICIO DE UNA INSTALACIÓN
DE HUMEDALES ARTIFICIALES77**

10.- MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE INSTALACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES	81
10.1.- Mantenimiento del Pretratamiento y Tratamiento Primario	81
10.1.1.- Desbaste	81
10.1.2.- Tratamiento Primario: fosas sépticas-tanques Imhoff	83
10.2.- Mantenimiento de los Humedales Artificiales	83
10.3.- Seguimiento del proceso	87
10.4.- Anomalías más frecuentes y su solución	91
 11.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	 93
11.1.- Ventajas	93
11.2.- Inconvenientes.....	95
 12.- LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN ESPAÑA Y EN ANDALUCÍA	 97
12.1.- Costes de implantación de los Humedales Artificiales en función del tamaño de la población servida	104
 BIBLIOGRAFÍA.....	107

1.- INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales urbanas mediante la tecnología de *Humedales Artificiales* se basa en la reproducción artificial de las condiciones propias de las zonas húmedas naturales, al objeto de aprovechar los procesos de eliminación de contaminantes que se dan en las mismas.

Cabe distinguir dos tipos básicos de *Humedales Artificiales*, los *Humedales de Flujo Superficial*, en los que las aguas a tratar, en forma de láminas de poco espesor, circulan a través de los tallos de las plantas emergentes implantadas en el humedal, y los *Humedales de Flujo Subsuperficial*, en el que las aguas discurren a través de un sustrato filtrante, que sirve de soporte a la vegetación, no siendo visible el agua en este tipo de humedales.

El empleo de *Humedales de Flujo Subsuperficial* para el tratamiento de las aguas residuales tiene su origen en los trabajos de K. Seidel, del Max Planck Institute (Alemania), a comienzos de los años 50. En años posteriores K. Seidel trabajó con R. Kickuth en el desarrollo de un sistema de tratamiento conocido como “*Root Zone Method*”, que operaba con flujo subsuperficial horizontal, recurriendo al empleo de arcilla como sustrato filtrante.

Siguiendo las directrices emanadas del Max Plank Institute se construyó en 1974, en una localidad alemana, el primer *Humedal Artificial* europeo a escala real.

El hecho de emplear en los albores de esta tecnología como sustrato filtrante el propio suelo natural, provocó que un gran número de instalaciones construidas en los años 70 y 80 presentasen problemas operativos, como consecuencia de la colmatación de los sustratos, no cumpliéndose las expectativas previstas.

La situación se invirtió a inicios de los 80, al comenzar a emplearse como medios filtrantes gravillas y gravas, al objeto de garantizar la adecuada conductividad hidráulica y minimizar los riesgos de colmatación del sustrato, lo que condujo a un auge en la implantación de este tipo de tecnología.

En lo referente a los *Humedales Artificiales de Flujo Superficial*, a principios de la década de los 70 se comenzaron a emplear en algunos estados de USA a modo de tratamientos terciarios, recibiendo como influentes aguas ya tratadas previamente.

En la actualidad los *Humedales Artificiales* se emplean para la depuración de aguas residuales, tanto urbanas como industriales, y para el tratamiento de las aguas de tormenta y de escorrentía agrícola. También se está recurriendo al empleo de esta tecnología para la deshidratación de lodos de depuradoras.

Si bien, a nivel mundial se cuentan por miles las instalaciones existentes de *Humedales Artificiales*, destacando países como: Estados Unidos, Gran Bretaña, Dinamarca, Alemania, Bélgica, Francia, República Checa, etc., en España se asiste actualmente al despegue de esta tecnología de tratamiento, como lo demuestra el hecho de que más del 80% de los *Humedales Artificiales* existentes en la actualidad (unos 40), se han construido en los últimos 5 años, siendo la modalidad más habitual la de *Flujo Subsuperficial*. La mayor parte de estos humedales se ubican en Cataluña (*Puigagut y col., 2006*).

2.- FUNDAMENTOS

Los *Humedales Artificiales* son zonas construidas por el hombre en las que, de forma controlada, se reproducen los procesos de eliminación de contaminantes que tienen lugar en los humedales naturales.

El carácter artificial de este tipo de humedales viene definido por las siguientes particularidades:

- El confinamiento del humedal se construye mecánicamente y se impermeabiliza para evitar pérdidas de agua al subsuelo.
- Se emplean sustratos diferentes al terreno original para el enraizamiento de las plantas.
- Se eligen las plantas que van a colonizar el humedal.

La depuración de las aguas residuales a tratar se consigue haciéndolas pasar a través de zonas húmedas artificiales, en las que tienen lugar procesos físicos, biológicos y químicos, que conducen a unos efluentes finales depurados.

La tecnología de *Humedales Artificiales* puede ser considerada como un complejo ecosistema, en el que los principales actores son:

- *El sustrato*: que sirve de soporte a la vegetación y permite la fijación de la población microbiana (en forma de biopelícula), que va a participar en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes presentes en las aguas a tratar.
- *La vegetación (macrófitas)*: que contribuye a la oxigenación del sustrato, a la eliminación de nutrientes y en la que también tiene lugar el desarrollo de biopelícula.
- *El agua a tratar*: que circula a través del sustrato y de la vegetación.

La vegetación que se emplea en este tipo de humedales es la misma que coloniza los humedales naturales, plantas acuáticas emergentes (carrizos, juncos, aneas, etc.), especies anfibia que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo.

Este tipo de plantas presentan una elevada productividad (50-70 toneladas de materia seca/ha.año) y toleran bien las condiciones de falta de oxígeno que se producen en suelos encharcados, al contar con canales o zonas de aireación (aerénquima), que facilitan el paso del oxígeno (producido por fotosíntesis), hasta la zona radicular.

3.- TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

En función de que el agua a tratar circule a través de los humedales superficialmente (por encima del sustrato) o de forma subterránea (a través del sustrato), los *Humedales Artificiales* se clasifican en:

- *Humedales Artificiales de Flujo Superficial*
- *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial*

3.1. Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS)

En este tipo de humedales el agua se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula, preferentemente, a través de los tallos de las plantas. Pueden considerarse estos humedales como una variedad de los Lagunajes clásicos, con las diferencias de que se opera con menores profundidades de la lámina de agua (inferiores a 0,4 m), y de que las balsas se encuentran colonizadas por plantas acuáticas emergentes (*Figura 1, ver página siguiente*).

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

La alimentación a estos humedales se efectúa de forma continua y la depuración tiene lugar en el tránsito de las aguas a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente implantada. Tallos, raíces y hojas caídas sirven de soporte para la fijación de la película bacteriana responsable de los procesos de biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de microalgas.

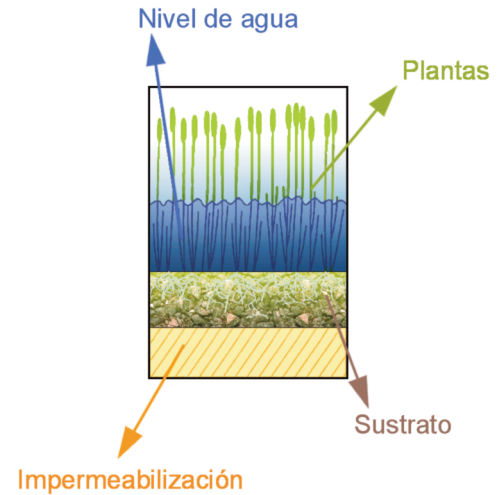
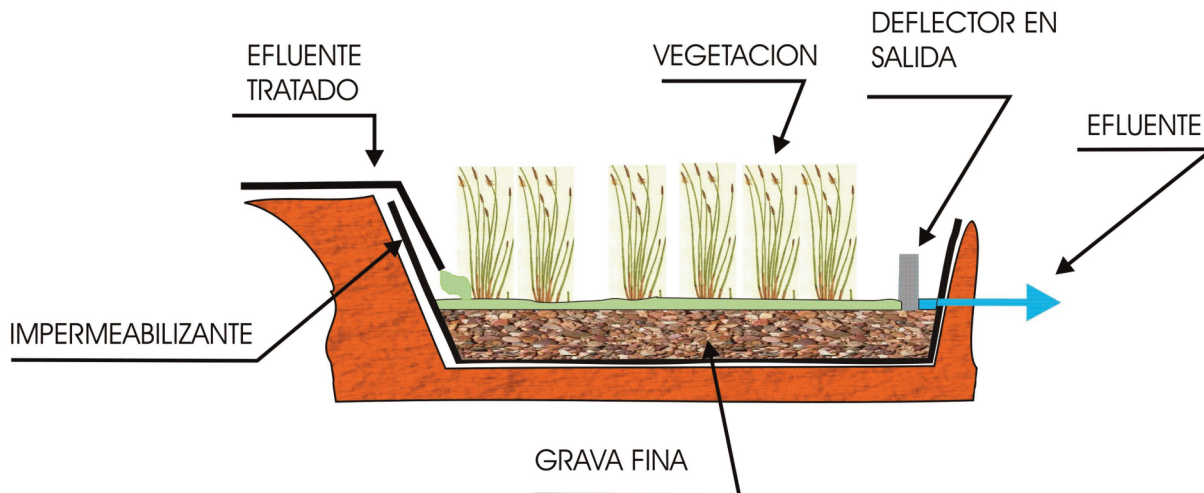


Figura 1.- Cortes transversal y longitudinal de un Humedal Artificial de Flujo Superficial.

HAFS



3.2. Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HAFSs)

En estos humedales el agua a tratar circula exclusivamente a través de un material granular (arena, gravilla, grava), de permeabilidad suficiente, confinado en un recinto impermeabilizado, y que sirve de soporte para el enraizamiento de la vegetación, que habitualmente suele ser carrizo.

Los *HAFSs* son generalmente instalaciones de menor tamaño que los de *Flujo Superficial*, y que en la mayoría de los casos se emplean para el tratamiento de las aguas residuales generadas en núcleos de población de menos de 2.000 habitantes.

Este tipo de humedales presenta ciertas ventajas con respecto a los de *Flujo Superficial*, al necesitar menos superficie de terreno para su ubicación y al evitar los problemas de aparición de olores y de mosquitos, al circular el agua subsuperficialmente. Igualmente, presentan una mejor respuesta ante los descensos de la temperatura ambiente.

Como desventajas cabe citar su mayor coste constructivo, motivado principalmente por el coste de adquisición y colocación del sustrato filtrante, y los mayores riegos de colmatación de dicho sustrato.

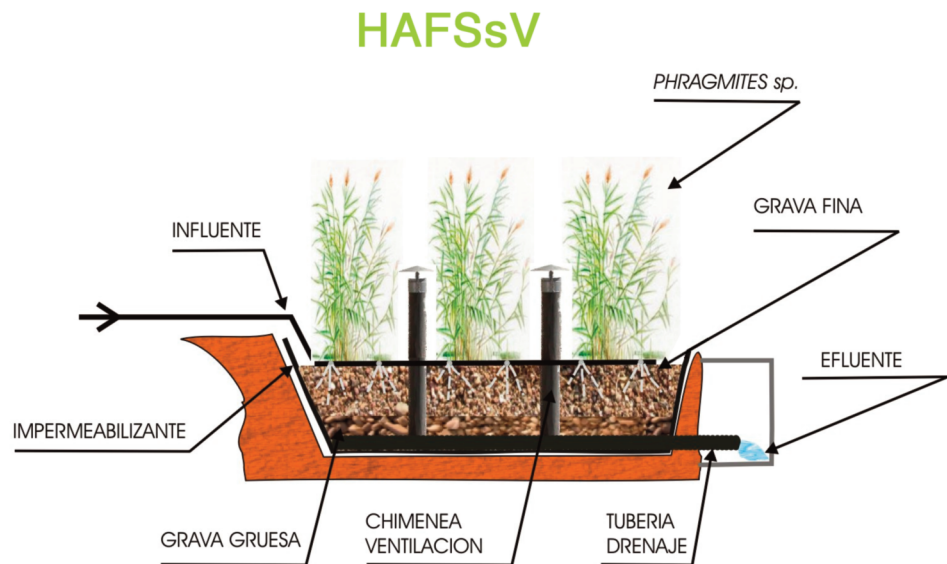
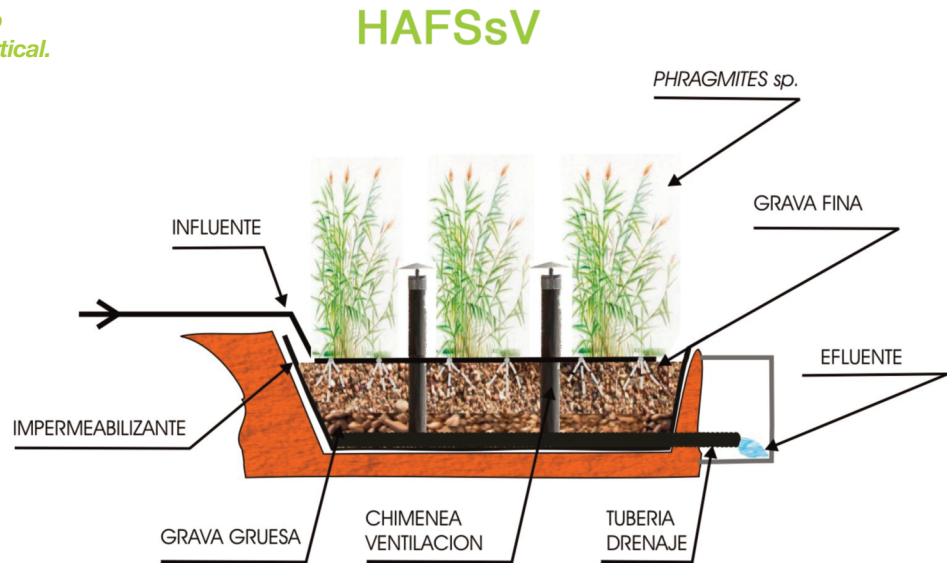
Según la dirección en la que circulan las aguas a través del sustrato, los HAFSs se clasifican en *Horizontales y Verticales* (Figura 2).

En los horizontales la alimentación se efectúa de forma continua, atravesando las aguas horizontalmente un sustrato filtrante de gravillas-grava de unos 0,6 m de espesor, en el que se fija la vegetación. A la salida de los humedales una tubería flexible permite controlar el nivel de encharcamiento, que suele mantenerse unos 5 cm por debajo del nivel de los áridos, lo que impide que las aguas sean visibles.

En los verticales la alimentación se efectúa de forma intermitente, para lo que se recurre generalmente al empleo de sifones de descarga controlada. Las aguas circulan verticalmente a través de un sustrato filtrante de arena-gravilla, de aproximadamente 1 m de espesor, en el que se fija la vegetación. En el fondo de los humedales una red de drenaje permite la recogida de los efluentes depurados. A esta red de drenaje se conectan un conjunto de chimeneas, que sobresalen de la capa de áridos, al objeto de incrementar la oxigenación del sustrato filtrante.

Los humedales de flujo vertical operan con cargas superficiales orgánicas superiores a las que se emplean en los horizontales y generan efluentes con un mayor grado de oxigenación. Por otro lado, mientras que los de flujo horizontal operan con tiempos de retención hidráulica de varios días, en los de flujo vertical estos tiempos son tan sólo de unas horas.

Figura 2.- Cortes longitudinales de
Humedales Artificiales de Flujo
Subsuperficial Horizontal y Vertical.

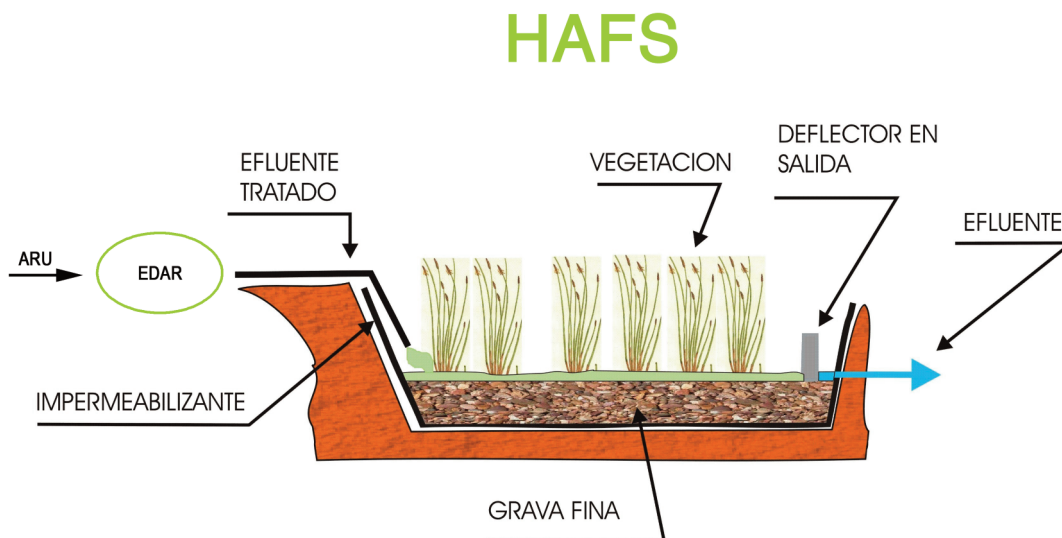


4.- ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1.- Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Los *HAFS* suelen ubicarse a continuación de estaciones de depuración que alcanzan niveles de tratamiento secundario (*Figura 3*).

Figura 3.- Esquema de funcionamiento de un Humedal de Flujo Superficial.



4.2.- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

En este tipo de humedales el esquema del proceso es, en esencia, semejante al de un tratamiento convencional, constando de Pretratamiento, Tratamiento Primario, Tratamiento Secundario y, opcionalmente, Tratamiento Terciario.

4.2.1.- Pretratamiento

Tiene como objetivo la eliminación de los objetos gruesos y de las grasas y flotantes que se encuentran en las aguas residuales a tratar, dado que su presencia en el resto de etapas del tratamiento podría provocar problemas de obturaciones en las conducciones y la rápida colmatación de los sustratos filtrantes.

Normalmente, el Pretratamiento en la tecnología de *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial* está constituido exclusivamente por un desbaste de gruesos.

Desbaste de gruesos

La eliminación de sólidos gruesos suele llevarse a cabo haciendo pasar las aguas residuales a través de rejillas de desbaste, de 2-3 cm de separación entre barros, y de limpieza manual (*Figura 4*).

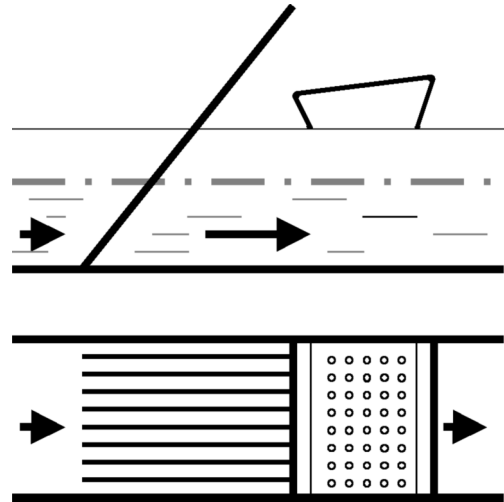


Figura 4.- Esquema y fotografía de una reja de desbaste de limpieza manual.



4.2.2.- Tratamiento Primario

Para conseguir una mayor eliminación de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales a tratar, y minimizar por tanto los riesgos de colmatación del sustrato filtrante, se recurre a la implantación de fosas sépticas o tanques Imhoff, como paso previo a la alimentación a los humedales.

Fosas sépticas

Las fosas sépticas son dispositivos enterrados en los que decanta la materia sedimentable presente en las aguas residuales. La fracción orgánica de esta materia sedimentada experimenta reacciones de degradación anaerobia, mineralizándose paulatinamente.

Estos dispositivos se encuentran compartimentados, siendo la disposición más común la de dos compartimentos dispuestos en serie. Al llegar el agua al primer compartimento, la materia más densa sedimenta y se deposita en el fondo en forma de lodo, mientras que la materia particulada más ligera forma una costra en la superficie. El agua clarificada pasa al segundo compartimento a través de un orificio practicado en la pared de separación y situado por debajo del nivel líquido. En este segundo compartimento tiene lugar también una sedimentación de sólidos y formación de costra, como consecuencia de los materiales que escapan de la etapa anterior, pero en menor cuantía (Figura 5).

Los lodos retenidos en el fondo de los distintos compartimentos experimentan reacciones de degradación anaerobia, mineralizándose y reduciendo su volumen, lo que permite que las fosas funcionen durante largos períodos de tiempo sin necesidad de purgar el excedente de lodos.

Las burbujas de gas que se producen en la degradación anaerobia de los lodos decantados obstaculizan la normal sedimentación de los sólidos presentes en las aguas residuales influentes. Es por ello, por lo que se dispone un segundo compartimento, en el que las partículas más ligeras encuentran condiciones de sedimentación más favorables.

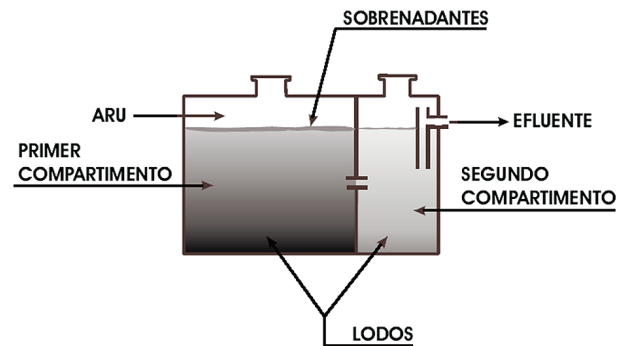


Figura 5.- Esquema de una fosa séptica de dos cámaras.

Tanques Imhoff

Los tanques Imhoff constan de un único depósito, en el que se separan la zona de sedimentación, que se sitúa en la parte superior, de la de digestión de los sólidos decantados, que se ubica en la zona inferior del depósito. La configuración de la apertura que comunica ambas zonas impide el paso de gases y partículas de fango de la zona de digestión a la de decantación, de esta forma se evita que los gases que se generan en la digestión afecten a la decantación de los sólidos en suspensión sedimentables (*Figura 6*).

Para minimizar los riesgos de colmatación del sus-

trato filtrante, en los *HAFSs* es de vital importancia el correcto dimensionamiento y operación de los elementos constitutivos del Tratamiento Primario.

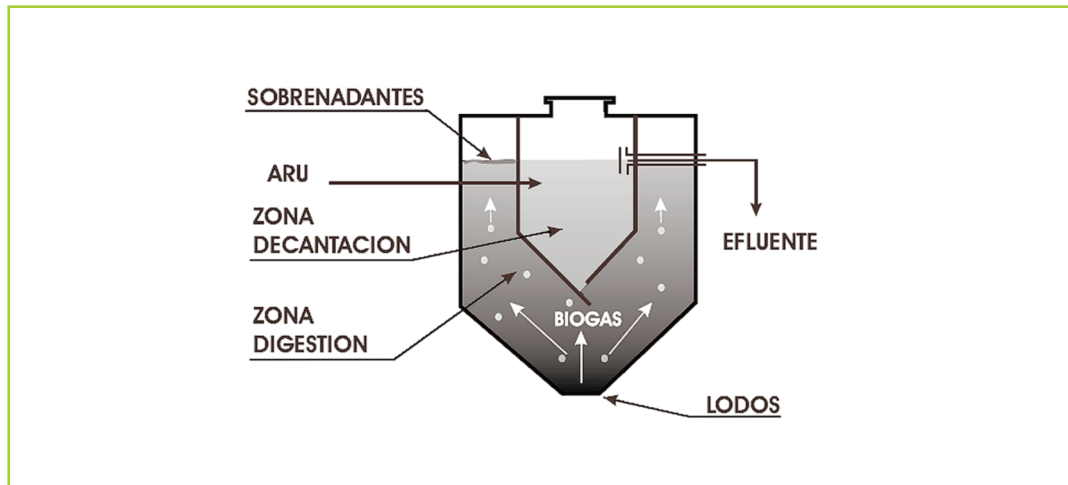


Figura 6.- Esquema un tanque Imhoff.

4.2.3.- Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario está constituido por los propios *Humedales Artificiales*, que se alimentan con los efluentes procedentes de las fosas sépticas o de los tanques Imhoff.

Las Figuras 7 y 8 muestran los diagramas de flujo más habituales de los tratamientos de aguas residuales mediante *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial*.

4.2.4.- Tratamiento Terciario

En ocasiones, se someten a los efluentes de los *HAFSs* a una etapa de afino en Lagunas de Maduración para mejorar, principalmente, el grado de abatimiento de los organismos patógenos. Esta eliminación se produce, fundamentalmente, por la acción de la radiación ultravioleta de la luz solar (Figura 9).

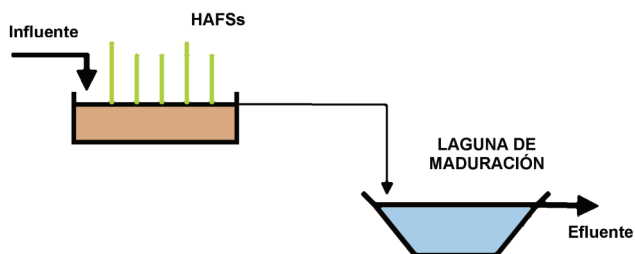


Figura 9.- Lagunaje de Maduración en cola de un *HAFSs*, a modo de Tratamiento Terciario.

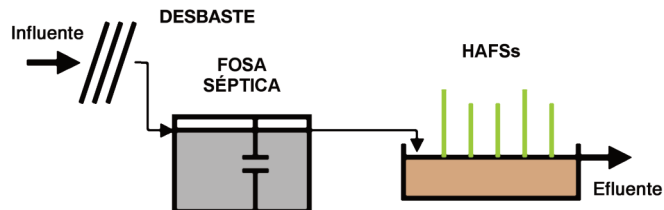


Figura 7.- Diagrama de flujo del tratamiento mediante *HAFSs*.

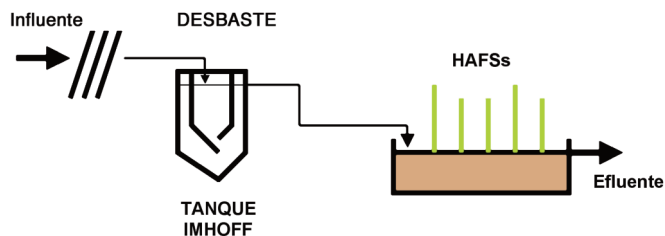


Figura 8.- Diagrama de flujo del tratamiento mediante *HAFSs*.



Figura 10.- Lagunaje en cola de una instalación de *Humedales Artificiales*. (Oaklands Park, Reino Unido).

4.3.- Otros esquemas

Combinaciones de HAFSs Verticales y Horizontales

El objetivo básico de este tipo de combinación de *Humedales Artificiales* es la mejora en los rendimientos de eliminación de nitrógeno. En los *HAFSs Verticales*, colocados en cabecera del proceso, se producen procesos de nitrificación, mientras que en los *Horizontales*, situados a continuación, se dan los fenómenos de desnitrificación, escapando el nitrógeno, en forma gaseosa, a la atmósfera.

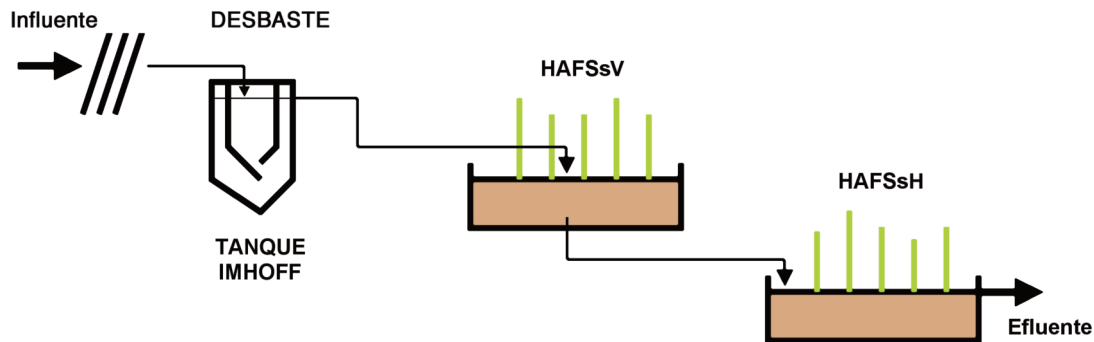


Figura 11.- Combinación de *HAFSs Verticales y Horizontales* en serie.

Combinación de *HAFSs* *Verticales* sin Tratamiento Primario

Esta combinación consta de dos conjuntos de *HAFSs Verticales* dispuestos en serie (*Figura 12*). Las aguas residuales, tras su paso por una reja de desbaste de unos 2 cm de paso, y sin ser sometidas a una etapa de Tratamiento Primario, alimentan de forma intermitente, gracias al empleo de un sifón de descarga controlada, a la primera etapa de humedales. Los efluentes de esta primera etapa se reúnen, y con la ayuda de un segundo sifón, alimentan de forma discontinua a la segunda etapa.

Cada humedal que integra la primera fase del tratamiento se somete alternativamente a dos fases operativas:

- Una fase de *alimentación*: durante 3-4 días las aguas alimentan a un único filtro de la primera etapa.
- Una fase de *reposo*: con una duración de al menos dos veces superior a la fase de alimentación (6-8 días).

Esta alternancia entre las fases de alimentación y reposo es fundamental para regular el crecimiento de la biomasa adherida al sustrato, mantener las condiciones aerobias y mineralizar los depósitos orgánicos procedentes de las materias en suspensión presentes en las aguas residuales y retenidas en los filtros de la primera etapa (*Liénard y col., 1990*).

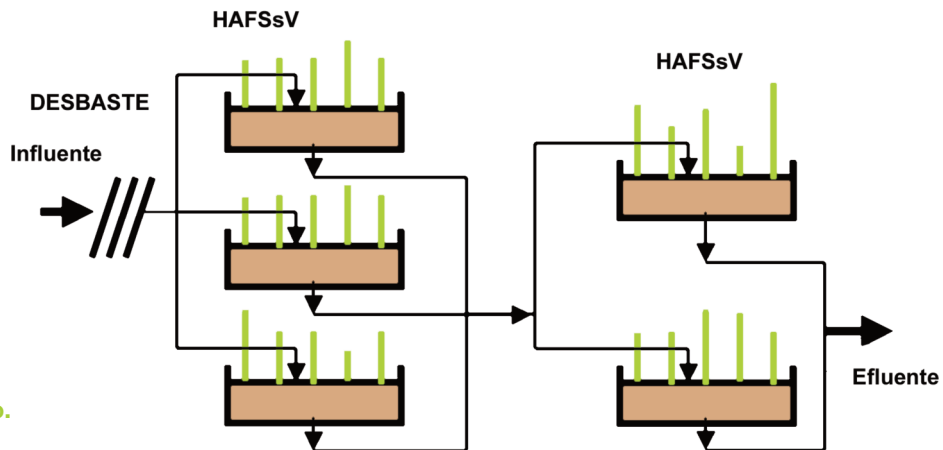


Figura 12.-
Combinación de
HAFSs Verticales sin
Tratamiento Primario.

5.- MECANISMOS DE DEPURACIÓN

Los mecanismos involucrados en la eliminación de los principales contaminantes presentes en las aguas residuales a tratar mediante el empleo de *Humedales Artificiales* son los siguientes:

5.1.- Eliminación de sólidos en suspensión

En la eliminación de la materia en suspensión mediante *Humedales Artificiales* intervienen procesos de:

- *Sedimentación*: la materia en suspensión sedimentable (principalmente de naturaleza orgánica), presente en las aguas a tratar decanta por la acción exclusiva de la gravedad.
- *Floculación*: permite la sedimentación de partículas de pequeño tamaño, o de menor densidad que el agua, al producirse agregados de las mismas con capacidad para decantar.
- *Filtración*: se produce la retención de materia en suspensión al pasar las aguas a través del conjunto que forman el sustrato, los rizomas, las raíces y los tallos de la vegetación.

En el caso de los *HAFS* la eliminación de la materia en suspensión tiene lugar, principalmente, por fenómenos de sedimentación y de filtración de las aguas a su paso por toda la masa de tallos y de los restos de vegetación caídos a la masa de agua. En este tipo de humedales para conseguir elevados rendimientos de eliminación de materia en suspensión se requiere disponer de zonas con abundante vegetación, que faciliten la sedimentación (al disminuir la velocidad de paso de las aguas) y la filtración, a la vez que, por el efecto sombra, se evita el crecimiento excesivo de microalgas, que como en el caso de los Lagunajes, podría incrementar los contenidos en sólidos en suspensión en los efluentes finales.

Para la evaluación de la eliminación de materia en suspensión en los *HAFS*, *Reed y col. (1995)*, proponen la siguiente expresión:

$$SS_e = SS_i (0,1139 + 0,00213 \cdot CHS)$$

siendo:

SS_e : concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l).

SS_i : concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l).

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d), que se calcula haciendo uso de la expresión:

$$CHS = 100 \cdot Q/S$$

donde:

Q: caudal del influente (m³/d).

S: superficie del humedal (m²).

En los *HAFSs* la eliminación de materia en suspensión tiene lugar, principalmente, por fenómenos de filtración a través del conjunto que forman el sustrato (sobre el que crecen las plantas), los rizomas y las raíces. Teniendo lugar el mayor porcentaje de eliminación de partículas en suspensión en la zona de entrada a los humedales.

Para la evaluación de la eliminación de la materia en suspensión en los *HAFSs*, *Reed y col. (1995)*, proponen la siguiente expresión:

$$SS_e = SS_i (0,1058 + 0,0011 \cdot CHS)$$

siendo:

SS_e : concentración de sólidos en suspensión en el efluente (mg/l).

SS_i : concentración de sólidos en suspensión en el influente (mg/l).

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d), que se calcula igual que en el caso anterior.

Los sólidos de naturaleza orgánica retenidos en el sustrato experimentan reacciones de biodegradación, que se aceleran en los momentos del año de temperaturas más elevadas. Esta degradación supone una fuente interna de materia orgánica disuelta, lo que podría explicar, según el informe *USEPA (2000)*, el porqué los *HAFSs* no presentan en época veraniega rendimientos más elevados de eliminación de materia orgánica que los que se logran en el periodo invernal.

Para evitar la rápida colmatación de los sustratos filtrantes se hace imprescindible la existencia previa de un Pretratamiento y de un Tratamiento Primario, que eliminen un alto porcentaje de la materia en suspensión presente en las aguas residuales a tratar.

En la actualidad, se comienza a trabajar combinando *Filtros de Turba y Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial*, prescindiendo del Tratamiento Primario mediante fosas sépticas o tanques Imhoff (*Salas y col., 2005*). Los elevados rendimientos de eliminación de sólidos en suspensión que se alcanzan en los Filtros de Turba (del orden del 90%), y la facilidad de manejo de los subproductos generados, costras secas en lugar de lodos líquidos, auguran un futuro prometedor para esta combinación de *Tecnologías no Convencionales*.

5.2.- Eliminación de materia orgánica

La materia orgánica, presente en forma de materia en suspensión sedimentable en las aguas residuales a tratar, irá decantando paulatinamente en los humedales y experimentará procesos de degradación biológica. Igualmente, parte de la materia orgánica, presente en forma particulada, quedará retenida por filtración, al pasar las aguas por el entramado sustrato-raíces-tallos.

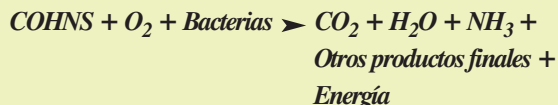
La eliminación de materia orgánica por las dos vías descritas transcurre de forma rápida, y en el caso de los HAFSs casi la mitad de la DBO_5 se elimina al pasar las aguas por los primeros metros del humedal (Aguirre, P., 2004).

Sobre la materia orgánica disuelta, al igual que sobre la particulada, actúan los microorganismos presentes en el humedal, principalmente bacterias, que utilizarán esta materia orgánica a modo de sustrato.

En las distintas modalidades de *Humedales Artificiales* se dan zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias sobre la materia orgánica tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aerobios como anaerobios.

En el caso de los procesos de degradación aerobios, una fracción de la materia orgánica es oxidada por la flora bacteriana, que obtiene de esta forma la energía necesaria para su mantenimiento celular.

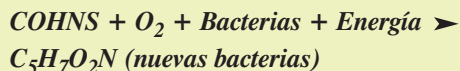
Oxidación



Donde COHNS representa los elementos predominantes en la materia orgánica presente en las aguas residuales.

De forma simultánea, otra fracción de materia orgánica se convierte en nuevo tejido celular (síntesis), empleándose para ello la energía liberada en la fase de oxidación.

Síntesis



Donde $C_5H_7O_2N$ representa la composición media de los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica (Hoover, S. y col., 1952).

Finalmente, cuando se consume toda la materia orgánica disponible, las bacterias empiezan a consumir su propio tejido celular con el fin de obtener energía para su mantenimiento. Este tercer proceso se conoce como respiración endógena.

Respiración endógena



El aporte de oxígeno para el mantenimiento de las reacciones de oxidación, síntesis y respiración endógena, transcurre de forma diferente en función de la modalidad de *Humedal Artificial* de que se trate.

En el caso de los *Humedales Artificiales de Flujo Superficial* la principal fuente de aportación de oxígeno a la masa líquida viene representada por los fenómenos de reaeración superficial provocados por el viento. Estos fenómenos se ven minimizados cuando la vegetación del humedal presenta una elevada densidad. Algo similar ocurre con el aporte de oxígeno vía fotosíntesis por las microalgas que se desarrollan en la masa líquida, y que queda reducido por el efecto sombra que ejercen las vegetaciones de alta densidad, que dificulta el desarrollo de estos organismos fotosintéticos.

En estos humedales, la aportación de oxígeno por las propias plantas acuáticas tiene una menor importancia, dada que la zona donde éste se libera (rizomas y raíces) se encuentra dentro del propio sustrato, por debajo de la columna de agua, y a que casi todo el oxígeno aportado por las plantas se consume por la demanda existente en los sedimentos presentes en el fondo del humedal. Con frecuencia, la zona aerobia queda limitada a las zonas de aguas abiertas y a una porción superior, bastante limitada, de la columna de agua.

En el caso de los *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Vertical*, la oxigenación del sustrato filtrante, en el que se encuentran adheridas las bacterias en forma de biopelícula, se produce, básicamente, por la intermitencia en la forma de administrar la alimentación, de aguas a tratar y por la propia configuración de este tipo de humedales, que permiten, que una vez finalizado un ciclo de alimentación, las aguas discurren en sentido descendente a lo largo del sustrato, volviendo el aire a ocupar los huecos que van quedando libre como consecuencia de este desplazamiento.

La vegetación propia de los *Humedales Artificiales* (plantas acuáticas emergentes), también contribuyen a la oxigenación, suministrando a través de sus raíces y rizomas parte del oxígeno que es producido por fotosíntesis en las hojas, y que es transportado a lo largo de un canal hueco conocido como aerénquima (Figuras 13 y 14).



Figura 13.- Detalle de la zona de rizomas y de raíces de una planta de carrizo (*Phragmites australis*).



Figura 14.- Detalle del aerénquima de una planta de carrizo (*Phragmites australis*).

Existen notables discrepancias en lo referente a las tasas de transferencia de oxígeno por los macrófitos, oscilando entre los 0,5-0,6 g O₂/m² .d (Tanner y col., 2003) y los 20 g O₂/m².d (USEPA, 1988).

En el caso de los *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal*, la presencia de oxígeno es mucho menor, debido a que el medio se encuentra saturado por el agua, que desplaza a los gases atmosféricos de los poros, dando lugar a un sustrato anóxico.

En las zonas de los humedales carentes de oxígeno molecular la degradación de la materia orgánica transcurre vía anaerobia, a lo largo de una serie de etapas concatenadas, en las que los compuestos resultantes de cada etapa sirven de sustrato a la etapa siguiente (Figura 15). Estas etapas son las siguientes:

Etapla hidrolítica: los compuestos orgánicos complejos (hidratos de carbono, proteínas, lípidos), son transformados en otros más sencillos (monosacáridos, aminoácidos, ácidos grasos, glicerol), que sirven de sustrato a las bacterias de la siguiente etapa. En esta etapa también se produce la solubilización de parte la materia orgánica particulada.

Etapla acidogénica: los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son transformados en ácidos orgánicos volátiles (acético, propiónico y butírico, fundamentalmente), mediante el concurso de bacterias generadoras de ácidos (acidogénicas, acetogénicas). La capacidad tampón del medio permite mantener los valores de pH próximos a la neutralidad.

Dado que los productos que se forman en esta etapa se encuentran muy poco estabilizados con relación a los iniciales, los rendimientos de eliminación de materia orgánica que se alcanzan, expresados como DBO₅ o DQO, son muy bajos.

Etapla metanogénica: los ácidos orgánicos volátiles, liberados en la anterior etapa, son transformados mediante el concurso de bacterias meta-

nogénicas, en biogás, mezcla de metano y anhídrido carbónico.

En esta fase es en la que tiene lugar realmente la reducción del contenido en materia orgánica, al transformarse ésta en biogás, que abandona el sistema.

Esta última etapa es la limitante del proceso global, como consecuencia de que las bacterias metanogénicas (anaerobias estrictas), son las que presentan un metabolismo más lento y son las más sensibles

a las condiciones ambientales presentes en las lagunas (pH, temperatura, presencia de tóxicos, etc.).

Se asume, que en los *Humedales Artificiales* los compuestos orgánicos son degradados de forma simultánea mediante procesos aerobios y anaerobios, siendo difícil cuantificar la proporción en que se producen cada uno de ellos.

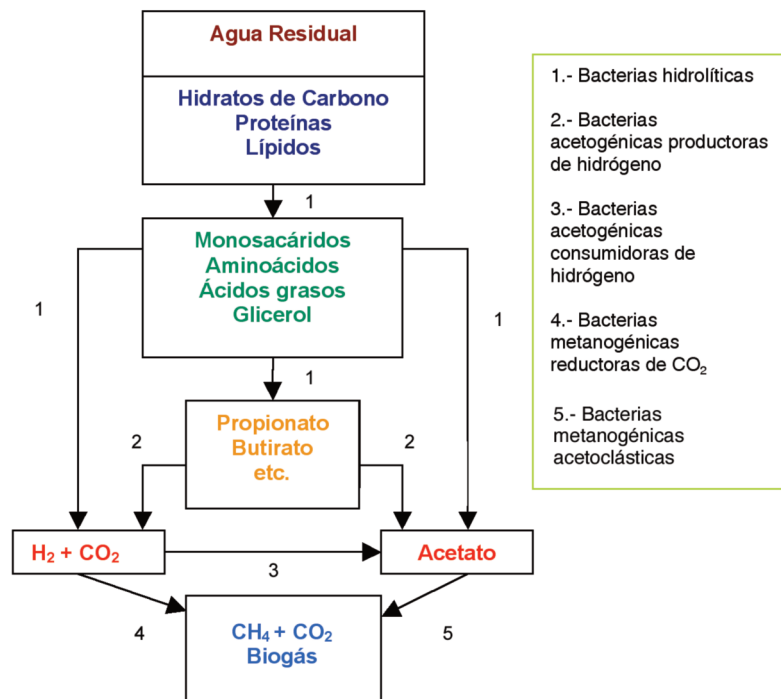


Figura 15.- Esquema de la degradación de la materia orgánica vía anaerobia.

5.3.- Eliminación de nutrientes

Nitrógeno

En las aguas residuales urbanas el nitrógeno puede encontrarse principalmente en forma orgánica y en forma amoniacal, y en mucha menor cuantía como nitritos o nitratos.

Mediante procesos de *amonificación*, por vía enzimática, las fracciones de nitrógeno en forma orgánica se transforman en formas amoniacales, parte de las cuales son asimiladas por los propios microorganismos, que la incorporan a su masa celular.

En los *Humedales Artificiales* la eliminación del nitrógeno en forma amoniacal transcurre básicamente por dos vías principales:

- *Asimilación* por las propias plantas del humedal.
- Procesos de *nitrificación-desnitrificación*.

En el caso de la asimilación del nitrógeno amoniacal por las plantas del humedal, numerosos estudios han concluido que, mediante esta asimilación y la posterior siega de las plantas, no se llega a eliminar más allá del 15-20% del nitrógeno amoniacal presente en las aguas a tratar. Si no se procede a la siega y retirada periódica de la vegetación de los humedales, la mayor parte de los nutrientes retenidos volverán a las aguas, mediante procesos de degradación de la biomasa vegetal.

Por tanto, la principal vía de eliminación del nitrógeno amoniacal en *Humedales Artificiales* transcurre mediante procesos combinados de nitrificación-desnitrificación.

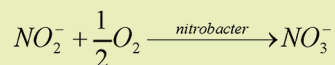
Las formas amoniacales se adsorben temporalmente sobre las partículas del sustrato filtrante de los *Humedales Artificiales* y sobre las partículas orgánicas cargadas eléctricamente, mediante mecanismos de intercambio catiónico. Para liberar este amonio adsorbido, y regenerar los campos de adsorción, se precisa la nitrificación de las formas amoniacales, constituyéndose la nitrificación en el proceso de transformación principal para la reducción de las concentraciones de amonio en los *Humedales Artificiales*.

La nitrificación es un proceso autotrófico (la energía necesaria para el crecimiento bacteriano se obtiene de la oxidación de compuestos inorgánicos), por el que el nitrógeno amoniacal es transformado en nitrógeno nítrico.

El proceso se desarrolla en dos etapas; en un primer momento bacterias del género *Nitrosomas* oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrógeno nitroso, de acuerdo con la reacción:



Posteriormente, bacterias del género *Nitrobacter* oxidan las formas nitrosas a formas nítricas, de acuerdo con:



Englobando el proceso de nitrificación en una única ecuación se obtiene:



Siendo necesarios 4,6 mg de oxígeno para oxidar 1 mg de N-amoniaco y consumiéndose una gran cantidad de alcalinidad (8,6 mg de HCO_3^- por cada mg de N-amoniaco oxidado).

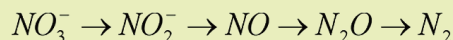
Las bacterias nitrificantes son organismos extremadamente sensibles a gran cantidad de sustancias inhibitoras, tanto orgánicas como inorgánicas, que pueden impedir el crecimiento y la actividad de estos organismos. Las altas concentraciones de amoníaco y de ácido nítrico (HNO_3) pueden resultar inhibitoras, siendo también importante el efecto del pH, cuyo intervalo óptimo es estrecho, entre 7,5 y 8,6.

La temperatura también ejerce una gran influencia sobre el crecimiento de las bacterias nitrificantes. Además, para que se produzca la nitrificación es fundamental que existan concentraciones de oxígeno disuelto por encima de 1 mg/l.

Si el nivel de oxígeno disuelto es inferior a este valor, el oxígeno se convierte en el nutriente limitante del proceso, y puede producirse el cese o la ralentización de la nitrificación.

Es necesario resaltar que la transformación de nitrógeno amoniacal en nitrógeno en forma de nitrato, no supone la eliminación del nitrógeno presente en las aguas a tratar, aunque sí permite eliminar su demanda de oxígeno. Para la eliminación biológica del nitrógeno se precisa que los procesos de nitrificación vayan seguidos de una etapa de desnitrificación.

La desnitrificación es realizada por bacterias facultativas heterótrofas (*Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Spirillum*), en condiciones de anoxia y en dos etapas. En un primer paso se produce la conversión del nitrato en nitrito, y a continuación éste pasa a formas gaseosas que escapan del sistema hacia la atmósfera (óxido nítrico, óxido nítrico y nitrógeno gas).



En los procesos de desnitrificación, el parámetro crítico es la concentración de oxígeno disuelto, cuya presencia suprime el sistema enzimático necesario para su desarrollo.

El pH óptimo para la desnitrificación se sitúa en el intervalo 7-8, viéndose también afectado el proceso por la temperatura.

La desnitrificación requiere igualmente la presencia de carbono orgánico en cantidad suficiente, admitiéndose que para reducir 1 g de nitrato se necesitan 3 g de DBO₅ no decantable.

En los *HAFSs Verticales* se potencian los procesos de nitrificación, debido, fundamentalmente, a que se alimentan de forma intermitente, lo que favorece un lecho más oxidado y, por tanto, más eficiente.

La adopción de sistemas combinados de humedales con diferentes características de flujo, *HAFSs Verticales* seguidos de *HAFSs Horizontales*, permite mejorar notablemente la eliminación de nitrógeno, al favorecerse en la primera etapa la nitrificación y la desnitrificación en la segunda.

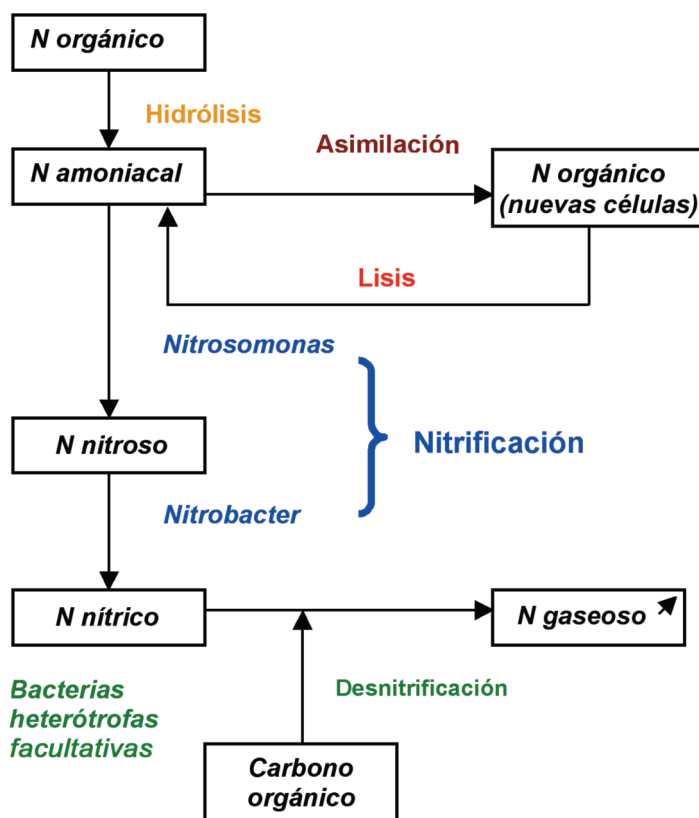


Figura 16.- Mecanismos de eliminación del Nitrógeno.

Fósforo

En las aguas residuales urbanas el fósforo se encuentra tanto en forma orgánica, como en forma de ortofosfato inorgánico o de fosfatos complejos. Estos últimos, en el transcurso de los tratamientos biológicos se hidrolizan dando lugar a ortofosfatos, incorporándose entre el 10-20% de los mismos a la biomasa bacteriana.

Las principales vías para la eliminación del fósforo en los *Humedales Artificiales* son:

- *Absorción* directa por parte de las plantas.
- *Adsorción* sobre el sustrato filtrante y sobre las partículas orgánicas.
- *Precipitación*, mediante reacciones del fósforo con el hierro, aluminio y calcio presentes en las aguas y en el sustrato, dando lugar a la formación de fosfatos insolubles.

La absorción del fósforo por las plantas se da en mucha menor cuantía que en el caso del nitrógeno (esta absorción es del orden de un 10%), siendo los fenómenos fisicoquímicos los que juegan el papel principal en la reducción de este nutriente mediante la tecnología de *Humedales Artificiales*.

El fósforo fijado-precipitado puede liberarse durante determinadas épocas del año, en función de las condiciones ambientales y, fundamentalmente, como respuesta a cambios en el potencial de óxido-reducción.

En general, en los *HAFSs* la eliminación de fósforo no es muy significativa situándose entre el 15-30%. Puede incrementarse este porcentaje de reducción de fósforo mediante el empleo de sustratos filtrantes específicos (p.e. con contenidos en hierro), que potencien la retención del mismo (*Arias y col., 2004*).

Tanto para *Humedales Artificiales Superficiales* como *Subsuperficiales*, *Reed y col. (1995)*, proponen la siguiente expresión, para la evaluación de la eliminación de fósforo total:

$$P_e = P_i \cdot \exp (-K_p / CHS)$$

siendo:

P_e : concentración de fósforo en el efluente (mg/l).

P_i : concentración de fósforo en el influente (mg/l).

K_p : constante de reacción con un valor de 2,73 cm/d.

CHS: carga hidráulica superficial (cm/d), que se calcula como en los casos anteriores.

Se ha observado, que en los *HAFSs* inicialmente se retiene una mayor proporción de fósforo, como consecuencia de que en esta etapa el sustrato presenta una mayor cantidad de zonas disponibles para su adsorción, disminuyendo paulatinamente esta capacidad de retención con el tiempo.

5.4.- Eliminación de metales pesados

La eliminación de metales (cadmio, cinc, cobre, cromo, mercurio, selenio, plomo), en los *Humedales Artificiales*, transcurre a través de diferentes vías:

- Procesos de adsorción.
- Precipitación química.
- Sedimentación.
- Asimilación por parte de las plantas.

Los metales retenidos pueden volver a liberarse en determinadas épocas del año, en función de las variaciones del potencial de oxido-reducción que tienen lugar dentro del sistema.

5.5.- Eliminación de organismos patógenos

Los organismos patógenos presentes en las aguas residuales a tratar se eliminan en los *Humedales Artificiales* por diferentes mecanismos, destacando entre ellos:

- La *absorción* de los patógenos sobre las partículas del sustrato filtrante.
- La *toxicidad* que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas.
- La *acción depredadora* de bacteriófagos y protozoos.

En los *Humedales Artificiales* la eliminación de coliformes fecales se ajusta a modelos de cinética de primer orden, lográndose la mayor parte del abatimiento en los primeros tramos de los humedales, de forma que hacia la mitad de los mismos ya se ha eliminado del orden del 80% de estos microorganismos.

Reed y col. (1995), asumiendo que los mecanismos de eliminación de patógenos en *Humedales Artificiales* son muy parecidos a los que se dan en los sistemas de Lagunaje, proponen una ecuación similar para cuantificar su abatimiento:

$$C_e = C_i / (1 + t \cdot K_T)^n$$

siendo:

C_e : concentración de patógenos en el efluente (UFC/100 ml).

C_i : concentración de patógenos en el influente (UFC/100 ml).

K_T : constante de reacción (d-1).

n : número de humedales en serie.

t : tiempo de retención (d).

La dependencia de la constante de reacción K_T con la temperatura, viene dada por la expresión:

$$K_T = K_R \cdot \theta_R^{(T_w - T_r)}$$

siendo:

K_R : constante de reacción a la temperatura de referencia (d^{-1}).

T_w : temperatura del agua considerada en el diseño ($^{\circ}C$). Suele emplearse la temperatura media del mes más frío.

T_r : temperatura de referencia a la que se ha calculado el coeficiente Θ_R ($^{\circ}C$) (suele ser $20^{\circ}C$).

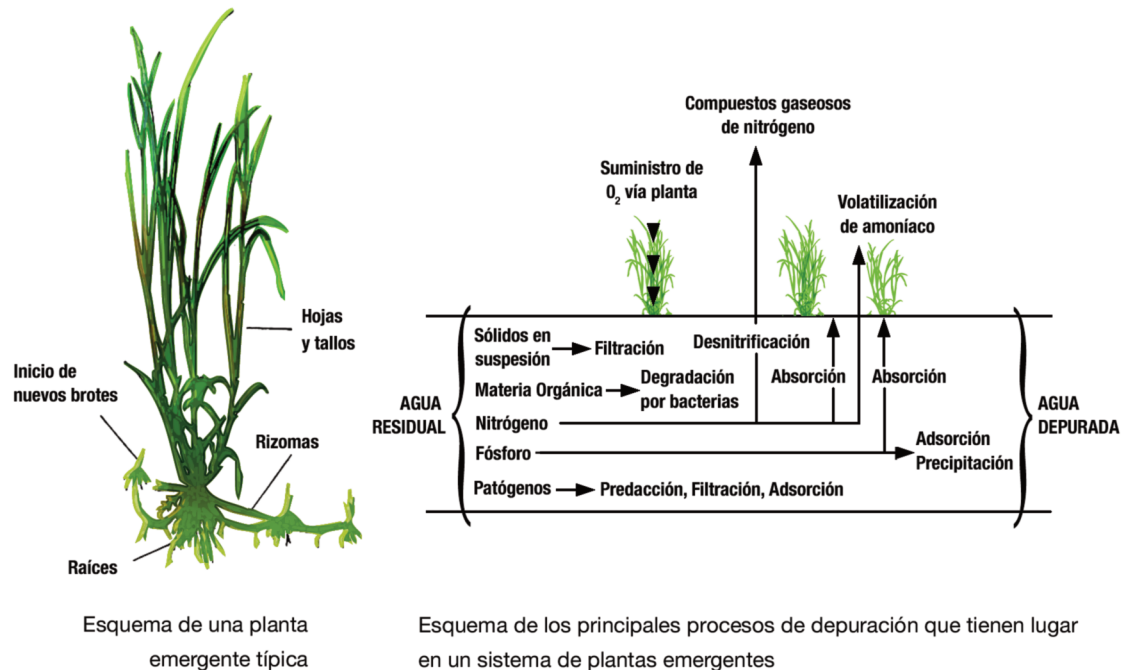
Θ_R = coeficiente de temperatura (adimensional).

Para el abatimiento de coliformes fecales, los valores de K_R y Θ_R , son $2,6 d^{-1}$ y $1,19$, respectivamente.

El abatimiento de patógenos en los sistemas de *Humedales Artificiales* se sitúa en torno a 1-2 unidades logarítmicas.

La *Figura 17* muestra los principales procesos que se dan en los *Humedales Artificiales* y que conducen a la reducción de los distintos contaminantes presentes en las aguas residuales objeto de tratamiento.

Figura 17.- Principales procesos de depuración que tienen lugar en los Humedales Artificiales



6.- RENDIMIENTOS DE DEPURACIÓN

6.1. - Humedales Artificiales de Flujo Superficial

Dado que los *HAFS* se suelen emplear a modo de tratamiento terciario, presentando las aguas influentes características muy variadas, en función del grado de depuración alcanzado en las etapas previas, para mostrar los rendimientos que se alcanzan en este tipo de humedales se ha optado por presentar las características medias de los influentes y efluentes de un conjunto de 27 *HAFS* sometidos a seguimiento por la EPA en el año 2000 (*Tabla I*).

Tabla I.- Características medias de las corrientes de entrada y salida de un conjunto de *HAFS* (EPA 2000).

Constituyente	Influente	Efluente
Sólidos en suspensión (mg/l)	69	15
DBO ₅ (mg/l)	70	15
N-NTK (mg/l)	18	11
N-NH ₃ /NH ₄ (mg/l)	9	7
N-NO ₃ (mg/l)	3	1
N _{total} (mg/l)	12	4
P _{total} (mg/l)	4	2
P _{disuelto} (mg/l)	3	2
Coliformes fecales (n°/100 ml)	73.000	1.320

A modo de complemento, la *Tabla II* muestra las concentraciones de sólidos en suspensión y DBO₅ en las corrientes de entrada y salida de distintos *HAFS* implantados en Estados Unidos, recogién-dose, igualmente, la procedencia de las corrientes de alimentación a estos humedales.

Tabla II.- Rendimientos de depuración de *HAFS* en Estados Unidos.

Constituyente	Tipo de influente	SST (mg/l)		DBO ₅ (mg/l)		Referencia
		Influente	Efluente	Influente	Efluente	
Arcata, California	Laguna de oxidación	30	14	26	12	Gearheart et al.,1989
Cannon Beach, Oregon	Laguna facultativa	45	8	27	5	U.S.EPA,1993
Fort Deposit, Alabama	Laguna de oxidación	91	13	33	7	U.S.EPA,1993
Gustine, California	Laguna de oxidación	102	31	75	19	Crites, 1996
Iselin, Pensilvania	Laguna de oxidación	380	53	140	17	Watson et al.,1979
Listowel, Ontario	Primario	111	8	56	10	Herskowit et al.,1987
Ouray, Colorado	Laguna de oxidación	86	14	63	11	Andrews,1996
West Jackson Co.,Mississippi	Laguna facultativa	40	14	26	7	U.S.EPA,1993

6.2.- Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial

La *Tabla III* muestra los rendimientos medios de depuración que se alcanzan con el empleo de *HAFSs* para el tratamiento de aguas residuales urbanas.

Tabla III.- Rendimientos de depuración en *HAFSs*.

Parámetro	%
Sólidos en suspensión	85 – 95
DBO ₅	80 – 90
DQO	75 – 85
N _{total}	20 – 40
P _{total}	15 – 30
Coliformes fecales	90 – 99

7.- DISEÑO DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

En la actualidad, los modelos más empleados para el dimensionamiento de los *Humedales Artificiales*, tanto de *Flujo Superficial* como *Subsuperficial*, parten de la base de considerarlos como reactores de flujo pistón, que siguen cinéticas de primer orden para la eliminación de los distintos contaminantes.

7.1.- Método de Reed y colaboradores

Este método, desarrollado en 1995, emplea ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción (por unidad de volumen) dependientes de la temperatura.

Para la eliminación, tanto de materia orgánica (DBO_5), como de amoníaco (NH_4^+) y de nitratos (NO_3^-), se propone el empleo de la ecuación:

$$\ln (C_i / C_e) = K_T t$$

siendo:

C_i : concentración del contaminante en cuestión en el influente (mg/l).

C_e : concentración del contaminante en cuestión en el efluente (mg/l).

K_T : constante de reacción (d^{-1}).

t : tiempo de residencia hidráulica (d).

Teniendo en cuenta que el tiempo de residencia hidráulica viene definido por la relación entre el volumen ocupado por el agua en el humedal (volumen efectivo) y el caudal de alimentación al sistema, se tiene que:

$$t = V_f / Q = S \cdot h \cdot p_s / Q$$

siendo:

- V_f : volumen efectivo (m³).
- Q : caudal de alimentación (m³/d).
- S : superficie el humedal (m²).
- h : profundidad de la lámina de agua (m). En los *Humedales de Flujo Superficial* esta profundidad es del orden de 0,4 m, y en los *Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal* oscila entre 0,4 y 0,6 m.

p_s : porosidad del sustrato filtrante (en tanto por 1). En el caso de los *Humedales de Flujo Superficial* la porosidad fluctúa entre 0,65–0,75, dependiendo del grado desarrollo de la vegetación implantada (Kadlec, R. y col., 1996).

En el caso de los *Humedales de Flujo Subsuperficial* la porosidad varía en función del tamaño del sustrato filtrante (Tabla IV).

Tabla IV.- Características de los diferentes medios empleados como sustratos en los HAFSs.

Tipo de medio	Tamaño efectivo d ₁₀ * (mm)	Porosidad (p _s)	Conductividad hidráulica (m/d)
Arena media	1	0,30	492
Arena gruesa	2	0,32	984
Arena pedregosa	8	0,35	4920
Grava mediana	32	0,40	9840
Grava gruesa	128	0,45	98400

* d₁₀: diámetro para el que el 10% del sustrato es más fino.

La dependencia de la constante de reacción K_T con la temperatura, viene dada por la expresión:

$$K_T = K_R \cdot \Theta_R^{(T_w - T_r)} \quad (I)$$

siendo:

- K_R : constante de reacción a la temperatura de referencia (d^{-1}).
- T_w : temperatura del agua considerada en el diseño ($^{\circ}C$) Se suele emplear la temperatura media del mes más frío.
- T_r : temperatura de referencia a la que se ha calculado el coeficiente Θ_R , que suele ser $20^{\circ}C$, ($^{\circ}C$).
- Θ_R : coeficiente de temperatura (adimensional).

Los valores de K_R y Θ_R , para cada tipo de contaminante en cuestión, se muestran en la *Tabla V*.

$$S = L \times A = \frac{Q \times t}{h \times \phi_s} = \frac{Q \times \ln(C_i / C_e)}{K_T \times h \times \phi_s}$$

siendo:

- h_r : profundidad del lecho ocupado por la rizosfera (m).
 - Combinando las tres ecuaciones anteriores, se obtiene la superficie necesaria del *Humedal Artificial* a construir:
- siendo:
- L: longitud del humedal (m).
 - A: anchura del humedal (m).

Tabla V.- Valores de de K_R y Θ_R , para cada tipo de contaminante.

	DBO ₅	NH ₄ ⁺ (nitrificación)	NO ₃ ⁻ (desnitrificación)
<i>Humedales Artificiales de Flujo Superficial</i>			
K_R (d^{-1})	0,678	0,2187	1
Θ_R	1,06	1,048	1,15
<i>Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial</i>			
K_R (d^{-1})	1,104	$0,01854 + 0,3922 (h_r)^{2,6077}$	1
Θ_R	1,06	1,048	1,15

7.2.- Método de Kadlec y Knight

Este método, desarrollado en 1996, considera que en los *Humedales Artificiales* la proliferación de microorganismos da lugar a la producción de nueva materia orgánica, parte de la cual quedará retenida en el propio humedal, mientras que el resto saldrá del sistema, empeorando la calidad final de los efluentes depurados. Existirán, por tanto, para cada parámetro, unas concentraciones umbral mínimas, por debajo de las cuales no es posible mejorar la calidad de las aguas depuradas. Estas concentraciones umbral se encuentran dentro de los intervalos recogidos en la *Tabla VI (Kadlec y col. 2000)*.

Tabla VI.- Valores umbrales para los distintos contaminantes.

Parámetro	Concentraciones umbral (mg/l)
Sólidos en suspensión	1 - 6
DBO ₅	1 - 10
N amoniacal	< 0,5
N nítrico	< 0,1
P total	< 0,1

El método emplea ecuaciones en las que se consideran las constantes de reacción por unidad de superficie, y no todas son dependientes de la temperatura (la temperatura sólo tiene importancia en la eliminación de sólidos en suspensión y de nitrógeno). Se trata, por tanto, de un método menos sensible a las condiciones climáticas que el método de *Reed y col.*

Según este modelo, la superficie necesaria de *Humedal Artificial* viene dada por la expresión:

$$S = \frac{365 \times Q}{K_T} \ln \left(\frac{C_i - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

siendo:

C*: concentración umbral (mg/l o UFC/100ml).

Los valores de los parámetros de esta ecuación se recogen en la *Tabla VII*. Para los sólidos en suspensión, y para las diferentes formas en que puede presentarse el nitrógeno, los valores de la constante de reacción tienen que ser corregidos en función de la temperatura, empleando la ecuación (I).

El empleo del método de *Kadlec y Knight* da lugar a mayores necesidades de superficie para la implantación de los *Humedales Artificiales*, como consecuencia de la introducción de las concentraciones mínimas umbral y del hecho de que la temperatura no influye en la eliminación de la materia orgánica.

Tabla VII.- Valores de los parámetros K_T , Θ_R y C^* , para los distintos contaminantes.

	S.S.	DBO ₅	Norg	N-NH ₄	N-NO ₃	Nt	Pt
<i>Humedales de Flujo Superficial</i>							
K_T (m/año)	1.000	34	17	18	35	22	12
Θ_R	1,065	-	1,05	1,04	1,09	1,05	-
C^* (mg/l)	5,1 + 0,16 Ci	3,5 + 0,053 Ci	1,5	0	0	1,5	0,02
<i>Humedales de Flujo Subsuperficial</i>							
K_T (m/año)	1.000	180	35	34	50	27	12
Θ_R	1,065	-	1,05	1,04	1,09	1,05	-
C^* (mg/l)	7,8 + 0,063 Ci	3,5 + 0,053 Ci	1,5	0	0	1,5	0,02

7.3.-Combinación de HAFSs Verticales sin Tratamiento Primario

Normalmente, esta modalidad de tratamiento precisa de dos etapas de *HAFSs Verticales*. Cada una de estas etapas está constituida, generalmente, por tres humedales, que trabajan de forma alternada, con lo que se aseguran periodos de reposo del orden de 2/3 del tiempo de operación total.

Para instalaciones que den servicio a aglomeraciones menores de 100 habitantes puede reducirse a dos el número de humedales por etapa, repartiéndose el tiempo entre operación y reposo. Para el diseño de estas instalaciones puede recurrirse al empleo de la ecuación siguiente:

$$F_1 = 3,5 P^{0,35} + 0,6 P$$

donde:
F₁: superficie de la primera etapa (m²).
P: población servida (habitantes equivalentes).

La superficie de la segunda etapa debe ser del orden del 60% de la primera.

La primera etapa de humedales emplea como sustrato filtrante gravas finas (para minimizar el riesgo de colmataciones dado que recibe las aguas residuales sin tratamiento primario), mientras que en la segunda etapa se recurre al empleo de arena como elemento filtrante.

8.- CONSTRUCCIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Este apartado centra la atención en los detalles constructivos de los elementos que constituyen las distintas modalidades de *Humedales Artificiales*, haciendo especial hincapié en los requisitos que deben cumplir los sustratos filtrantes.

8.1.- El confinamiento

Lo normal es construir los humedales por excavación en el terreno. En los *Humedales de Flujo Subsuperficial* el fondo suele presentar una pendiente del orden del 1% en la dirección entrada-salida, siendo esta pendiente algo menor en los *Humedales de Flujo Superficial*. Con relación a los taludes estos suelen ser de unos 45° en los *Humedales de Flujo Subsuperficial* y más suaves en los de *Flujo Superficial*.

En lo referente a la geometría del confinamiento, en los *Humedales de Flujo Superficial* se recomiendan relaciones Longitud/Anchura del orden de 5/1, mientras que en los de *Flujo Subsuperficial* es normal operar con relaciones 2-3/1.

Un aspecto constructivo de suma importancia es lograr que el confinamiento de los humedales sea estanco, para que no se produzcan fugas de agua, que pudieran contaminar el subsuelo por infiltración.

Si el suelo donde se va a ubicar el humedal presenta una baja permeabilidad bastará con proceder a su compactación, en caso contrario será necesario proceder a su impermeabilización, recurriendo al empleo de arcillas o bentonitas (que se irán compactando por tongadas, en capas de unos 10 cm de espesor), o utilizando láminas plásticas. Unos de los plásticos más empleados es el polietileno de alta densidad (PEAD), recomendándose espesores superiores al milímetro para evitar que la lámina pueda ser perforada por las raíces y rizomas de las plantas, o dañada por los propios áridos.

Para evitar punzamientos, tanto por piedras del propio terreno, como por el propio sustrato filtrante, se recomienda que por debajo y por encima de la lámina plástica se disponga una lámina de geotextil de 150 - 300 g/cm², o que se extienda una capa de arena por debajo de la lámina plástica.

En la impermeabilización mediante lámina plástica debe controlarse exhaustivamente las soldaduras entre las láminas (por aire caliente o por compuestos químicos) y el buen anclaje de las láminas al terreno. El método más habitual para anclar la lámina plástica al terreno en la coronación de los taludes, consiste en excavar una zanja de aproximadamente 1 m de ancho, introducir la lámina impermeable y volver a llenar la zanja con tierra para que la lámina quede atrapada. Para este menester también puede recurrirse al empleo de grapas metálicas.



Figura 18.- Excavación del confinamiento de un Humedal Artificial.



Figura 19.- Perfilado de los taludes del confinamiento de un Humedal Artificial.



Figura 20.- Colocación de una lámina de geotextil en un Humedal Artificial.



Figura 21.- Colocación de una lámina plástica para impermeabilizar el confinamiento.



Figura 22.- Aspecto de un humedal tras finalizar la etapa de impermeabilización.



Figura 23.- Sujeción de la lámina plástica mediante grapa metálica.

8.2.- La evacuación de los efluentes depurados

En los *Humedales de Flujo Superficial* las aguas, tras recorrer longitudinalmente todo el humedal, se evacúan al exterior. En humedales de grandes extensiones se recomienda que la evacuación tenga lugar por varios puntos, para evitar en los posible, la creación de caminos preferentes.

Mediante el empleo de tuberías abatibles, extensibles o flexibles, se controla el nivel del agua en los humedales, que para esta modalidad suele ser de 0,2-0,4 m.

Para minimizar el escape de flotantes, y principalmente en humedales de pequeñas dimensiones, en las zonas de evacuación de efluentes suelen colocarse chapas deflectoras (Figura 24).



Figura 24.- Chapa deflectora en la salida de un Humedal de Flujo Superficial.

En los *Humedales de Flujo Subsuperficial* la evacuación de los efluentes es diferente según se trate de *Humedales Horizontales* o *Verticales*. En los *HAFSS Horizontales* la evacuación de las aguas depuradas suele realizarse a través de tuberías de drenaje embutidas en el fondo de una zona de bolos gruesos (50-100 mm), dispuesta en la zona de salida del humedal. Estos drenes conectan con una tubería final flexible, ubicada en la arqueta de evacuación de efluentes. Esta tubería permite modificar el nivel de encharcamiento del sustrato, siendo lo habitual que el nivel de agua en el humedal quede uno 5 cm por debajo de la superficie de los áridos.



Figura 25.- Tuberías de drenaje para la evacuación de efluentes en HAFSS Horizontales. Las tuberías quedan embutidas en una capa de bolos de 50-100 mm.



Figura 26.- Detalle del enlace de las tuberías de drenaje con la tubería de evacuación a través del fondo de la arqueta de salida.



Figura 27.- Recubrimiento de los drenes de evacuación con una capa de bolos de 50-100 mm.



Figura 28.- Tubería de evacuación de efluentes, conectada a las tuberías de drenaje. Al ser flexible permite controlar el nivel del agua en el sustrato filtrante.

En el caso de los *HAFSs Verticales* los efluentes, tras atravesar verticalmente el sustrato, son recogidos por un conjunto de tuberías de drenaje dispuestas en el fondo del humedal, que descargan en la arqueta de salida. Estas tuberías quedan embutidas en una capa de grava, de unos 25-40 mm de tamaño.



Figura 29.- Conjunto de tuberías de drenaje para la evacuación de los efluentes depurados en un *HAFSs Vertical*.



Figura 30.- Las tuberías de drenaje conducen los efluentes depurados hasta la arqueta de salida.



Figura 31.- Las tuberías de drenaje se van cubriendo con una capa de grava de 25-40 mm.



Figura 32.- La capa de grava que recubre a las tuberías de drenaje se extiende por todo el fondo del humedal.



Figura 33.- Detalles de las tuberías de evacuación de efluentes en la arqueta de salida.

8.3.- La ventilación del sustrato filtrante

En el caso de los *HAFSs Verticales*, para favorecer la oxigenación del sustrato, suele ser frecuente que se conecten a las tuberías de drenaje chimeneas verticales, que sobresalen por encima del medio filtrante, y que ejercen un efecto de tiro y renovación del aire presente en los drenes.



Figura 34.- Colocación de las chimeneas de ventilación en un HAFSs Vertical.



Figura 35.- Detalle de las chimeneas de ventilación en un *HAFSs Vertical*.

8.4.- Las capas de áridos

En los *Humedales de Flujo Superficial*, para el enraizamiento de la vegetación se puede recurrir al empleo tanto de tierra vegetal como de áridos (arena, gravilla). Dado que en este tipo de humedales la circulación del agua es básicamente a través de los tallos de las plantas, y en muy poca medida a través del sustrato, éste no juega un papel destacado.

Por el contrario, en los *Humedales de Flujo Subsuperficial* las capas de áridos que forman el sustrato filtrante constituyen la parte esencial del sistema de tratamiento, dependiendo de su rigurosa selección y adecuada colocación el buen funcionamiento del humedal, puesto que uno de los mayores riesgos de este tipo de humedales es la posible colmatación del medio filtrante.

En el caso de los *HAFSs Horizontales* el tamaño de los áridos que se emplean va en función de la naturaleza de las aguas a tratar, siendo mayor el tamaño cuanto más cargadas se encuentren estas aguas. De este modo, los tamaños oscilan entre 3-6 mm, para aguas poco cargadas, y 6 -12 mm para aguas de alta carga.

El espesor del sustrato en el punto medio del humedal es de unos 60 cm, si bien, comienza a trabajarse con espesores en torno a 30-40 cm, buscando un mayor grado de oxigenación y ante la comprobación de que la mayor parte de las raíces y rizomas no penetran en el sustrato más allá de 40 cm (García y col., 2004) (Figura 36).



Figura 36.- Penetración de los rizomas en el sustrato (aproximadamente 30 cm), tras cinco años de operación de un HAFSs en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes.

En los *HAFSS Verticales* el sustrato filtrante, que como mínimo debe presentar 1 m de espesor, está constituido por arena con un d_{10} comprendido entre 0,25 y 1,2 mm, y con un d_{60} entre 1 y 4 mm. El Coeficiente de Uniformidad (d_{60}/d_{10}) debe ser inferior a 3,5 y los contenidos en arcilla y finos deben limitarse a menos del 0,5% (Brix, H., 2004).

Cuando se opera con aguas residuales cargadas debe aumentarse el tamaño de las partículas que constituyen el sustrato filtrante, y así, en el caso de la modalidad que recurre al empleo de dos etapas de *HAFSS Verticales* dispuestas en serie, prescindiendo de tratamientos primarios, en la primera etapa se emplea una capa superficial de unos 40 cm de gravilla de 2-8 mm, que descansa sobre otra de 10-20 mm.

En la segunda etapa, en la que ya los riesgos de colmatación son menores, se trabaja con capas de arena de unos 30 cm de espesor. Siendo la capa drenante, dispuesta en el fondo de los humedales grava de 20-40 mm (Comisión Europea, 2003).

A la hora de la selección del sustrato filtrante para los *Humedales Artificiales* es imprescindible disponer de un material suficientemente homogéneo en forma y tamaño (bajos Coeficientes de Uniformidad), y limpio (sin presencia de finos, lo que puede hacer necesario el lavado el material procedente de la cantera). Un material con elevado contenido en finos se puede colmatar fácilmente, acortando la vida útil del sistema.

Para la colocación del sustrato en el interior de los humedales puede recurrirse a diversos métodos, tanto manuales como mecánicos, pero en todo caso se procurará no dañar la lámina impermeabilizante ni los sistemas de drenaje ni de ventilación.



Figura 37.- Descarga directa de áridos en el interior de un Humedal Artificial.



Figura 38.- Descarga de áridos mediante cubilete en un *Humedal Artificial*.



Figura 39.- Distribución manual de áridos en un *Humedal Artificial*.



Figura 40.- Distribución mecánica de los áridos en un *HAFSs Horizontal*.

8.5.- El sistema de reparto de las aguas a tratar

Para lograr el buen funcionamiento hidráulico de los *Humedales Artificiales*, de forma que todo su volumen permanezca activo, evitando la aparición de caminos preferenciales, es preciso que la alimentación de los mismos se efectúe de la forma más uniforme posible.

En los *Humedales de Flujo Superficial* se utilizan vertederos o tuberías perforadas para distribuir el agua a tratar en la zona de entrada al humedal.

En el caso de los *HAFSs Horizontales* suele recurrirse al empleo de tuberías perforadas, que descargan sobre una zona de bolos gruesos (50-100 mm), dispuesta en cabecera del humedal y que permite la distribución uniforme de las aguas. El gran tamaño de estos áridos minimiza los problemas de obstrucción.

Recientemente, y al objeto de lograr un reparto más homogéneo de las aguas a tratar a lo largo de toda la zona de alimentación dispuesta en cabecera de los humedales, se comienza a recurrir al empleo de vertederos Thompson longitudinales.



Figura 41.- Tuberías de reparto en un HAFSs Horizontal.

Figura 42.- Reparto de la alimentación a un HAFSs Horizontal mediante vertedero Thompson. (EDAR de Corbins, Lleida).



En los *HAFSS Verticales* se recurre al empleo de tuberías perforadas o canaletas, que descargan las aguas, de forma uniforme, por toda la superficie de los humedales. En este tipo de humedales la velocidad de alimentación debe ser superior a la velocidad de infiltración sobre el sustrato filtrante, al objeto de lograr el reparto del influente sobre la mayor parte de la superficie del humedal. Cuando se tratan aguas residuales con altos contenidos en materia orgánica, resulta muy difícil cumplir este requisito de carga hidráulica sin sobrepasar los límites recomendados de carga orgánica.

En este tipo de humedales la alimentación debe efectuarse de forma intermitente, intercalándose los periodos de alimentación al humedal con periodos de reposo. Una forma de lograr esta alternancia en la alimentación, sin tener que recurrir a bombeo, se basa en el empleo de sifones de descarga controlada, con los que se puede regular el número de dosificaciones diarias de alimentación y el volumen de las mismas (*Figura 44*).



Figura 43.- Tuberías para el reparto de la alimentación en un *HAFSS Vertical*.



Figura 44.- Sifón de descarga controlada (Fuente: Rissi Plastics LLC).

8.6.- La plantación

En el caso de los *Humedales de Flujo Superficial* suele recurrirse a la implantación de varias especies vegetales, siendo las frecuentes: juncos, aneas, masiega, iris, juncia, etc., que se plantan mediante el empleo de rizomas o de semillas.

Figura 45.- Aspecto de un Humedal de Flujo Superficial recién plantado.



En el caso de los *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial* la especie vegetal predominantemente empleada es el carrizo (*Phragmites australis* sp.), que presenta, frente a otras, las siguientes ventajas:

- Perfecta adaptación a las condiciones hídricas de explotación de los humedales.
- Buena transferencia de oxígeno desde las partes aéreas hasta los rizomas y raíces, lo que favorece el desarrollo de bacterias en su entorno.
- Buena resistencia a la alternancia de periodos de alimentación y de reposo.
- Infiltración favorecida por el desarrollo de tallos a través de los que percola el agua, lo que reduce los riesgos de colmatación.
- Fácil adaptación a la altitud (salvo alta montaña) y a climas diversos.
- Mayor duración del ciclo vegetativo, permaneciendo activo durante un período de tiempo superior al de otras plantas emergentes.

Figura 46.- Aspecto del Humedal de Flujo Superficial al año de su plantación.

El establecimiento de la vegetación en los *HAFSs* puede realizarse recurriendo al empleo de plantas procedentes de viveros, o mediante multiplicación vegetativa a partir de los rizomas, que es el método más habitual, y para lo que se procede al troceado de los mismos en fragmentos de unos 5 cm de longitud, que se plantan en el sustrato con una densidad de unos 5 trozos/m². Con esta densidad de plantación se consigue la cobertura total del humedal en aproximadamente un año.

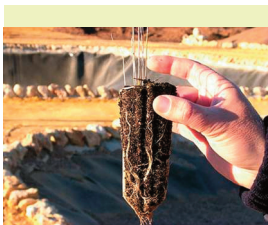


Figura 47.- Planta de *Phragmites australis* procedente de vivero.



Figura 48.- Distribución de las bandejas con plantas de vivero para lograr una plantación uniforme del humedal.



También se comienza a plantar humedales empleando trozos de tallos de carrizo, de unos 30 cm de longitud, que se clavan inclinados en el sustrato, de forma que su extremo inferior quede en contacto con el agua.

Figura 50.- *HAFSs Vertical* al año de su plantación.



Figura 51.- Trozos de rizomas de *Phragmites australis* preparados para su plantación.

Figura 49. - Detalle un *HAFSs Vertical* tras su plantación con plantas de vivero.

9.- PUESTA EN SERVICIO DE UNA INSTALACIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Como paso previo a la puesta en servicio de una instalación de *Humedales Artificiales* se procederá a la comprobación de:

- El correcto funcionamiento de los elementos integrantes del:
 - Pretratamiento: rejillas de desbaste.
 - Tratamiento primario: fosas sépticas, tanques Imhoff.
 - Sistema de medida de caudal.
 - Compuertas y válvulas que permiten el by-pass de las aguas y la puesta en marcha/paro de los diferentes humedales implantados.
- La estanqueidad de los recintos que contienen los sustratos filtrantes y las plantas.

La alimentación a los humedales se iniciará una vez finalizada la plantación, para favorecer su crecimiento.

Desde el primer momento de su puesta en operación los humedales comienzan su función depuradora, basada inicialmente en procesos de filtración a través del sustrato. Paulatinamente, sobre este soporte se irá desarrollando la biomasa bacteriana, comenzando a tener importancia los procesos biológicos de degradación de los contaminantes, a la vez que las plantas irán captando los nutrientes que precisan para su desarrollo.

En el caso de los *Humedales de Flujo Subsuperficial*, la etapa de arranque y estabilización del sistema, en la que se va desarrollando toda la zona radicular de las plantas y la biomasa bacteriana coloniza el sustrato y los rizomas y raíces, se extiende aproximadamente a lo largo de un ciclo vegetativo. En los *Humedales de Flujo Superficial* es preciso el transcurso de dos-tres ciclos vegetativos para alcanzar un régimen operativo estable (Kadlec y col., 1996).

Inicialmente, en los *Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal* el nivel de agua se mantendrá unos 5 cm por debajo de la superficie del sustrato filtrante, y se irá bajando paulatinamente para favorecer un más rápido desarrollo de la zona radicular de las plantas durante el primer ciclo de su crecimiento. Al final de este proceso, el nivel del agua en el sustrato recuperará su valor inicial.

Durante los periodos de puesta en operación de los humedales se procederá a la eliminación de toda la vegetación espontánea que pueda aparecer en los mismos, para evitar competencias con las especies implantadas.

10.- MANTENIMIENTO Y EXPLOTACIÓN DE INSTALACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Se describen a continuación las operaciones a llevar a cabo para la correcta explotación y mantenimiento de los diferentes elementos constitutivos de una estación depuradora basada en la tecnología de *Humedales Artificiales*.

10.1.- Mantenimiento del Pretratamiento y Tratamiento Primario

En el caso de los *Humedales Artificiales* y, fundamentalmente, en los de *Flujo Subsuperficial*, los tratamientos previos (Pretratamiento y Tratamiento Primario), son básicos e imprescindibles para prevenir colmataciones del sustrato filtrante y de los propios sistemas de reparto de las aguas a tratar.

10.1.1- Desbaste

- > Cuando se detecten sedimentaciones en el fondo de los canales en los que se ubican las rejillas de desbaste se procederá a su extracción para su envío a vertedero.
- > En aquellos casos en los que el desbaste se ubique en distintos canales, periódicamente se procederá a comprobar el funcionamiento y estanqueidad de las compuertas que permiten enviar las aguas hacia el canal que en cada momento se encuentre operativo. Si dichas compuertas

tienen vástagos de accionamiento, periódicamente se efectuará el engrase de los mismos.

Rejas de desbaste de limpieza manual

> La limpieza de estas rejas se efectuará por rastillado, depositándose los residuos que se extraigan en los cestillos perforados dispuestos al efecto, con objeto de conseguir su escurrido antes de su recogida en un contenedor, para su posterior envío a vertedero.

Deben tomarse especiales precauciones al rastillar las rejas de desbaste, dado que la firmeza de los pies del operario puede presentar dificultades debido al agua y a las grasas que suelen acumularse en la zona, a la falta de espacio para colocarse adecuadamente, y/o a la situación del contenedor en el que se depositan los residuos.

La periodicidad de la limpieza será, en principio, diaria, si bien la experiencia que se adquiriera con el tiempo de explotación de la estación depuradora fijará la frecuencia real con que haya que realizarse esta operación. No obstante, es aconsejable que dicha periodicidad no sea muy superior a la citada, aunque el volumen de sólidos retenidos sea escaso, para evitar la aparición de olores desagradables.

Especial atención se prestará a la limpieza de las rejas de desbaste en períodos de lluvias, dado que en esos momentos será mucho mayor el volumen y la heterogeneidad de los sólidos retenidos en las mismas.

Rejas de desbaste de limpieza automática

> Diariamente, para evitar la generación de olores desagradables, se deberá proceder a la retirada de los residuos extraídos para su envío a vertedero.

> Los tiempos de accionamiento de los peines de limpieza se ajustarán en consonancia con las observaciones que se efectúen sobre su funcionamiento, incrementándose en época de lluvias.

> De acuerdo con el programa de la casa fabricante de los equipos electromecánicos implantados en el desbaste, se procederá regularmente al engrase (empleando para ello el lubricante que se especifique) y a la supervisión de los elementos mecánicos que se indiquen.

> Los residuos que no sean extraídos por los peines se eliminarán de forma manual mediante rastillado, previa desconexión del equipo.

10.1.2.- Tratamiento Primario: fosas sépticas-tanques Imhoff

> Las grasas y flotantes que se acumulen en la superficie de las fosas sépticas o tanques Imhoff se retirarán periódicamente, haciendo uso de un recoge hojas de piscina.

La retirada de sobrenadantes se llevará a cabo cuando se observe la formación de una capa consistente de los mismos, al objeto de minimizar la extracción de agua. Las grasas retiradas se irán acumulando en un contenedor dispuesto al efecto, para su posterior recogida por agente autorizado.

> Periódicamente, se procederá a la extracción de los lodos acumulados. Para esta operación se requerirá el empleo de un camión cisterna dotado con equipo de bombeo. Los lodos extraídos se transportarán a una estación de tratamiento de fangos o podrán deshidratarse “in situ”, mediante el empleo de eras de secado.

10.2.- Mantenimiento de los Humedales Artificiales

Humedales de Flujo Superficial

> Periódicamente, se procederá a la limpieza de los sistemas de distribución ubicados en cabecera de los humedales. La frecuencia de esta operación la marcará las condiciones operativas de cada situación concreta.

> Debe controlarse la posible aparición de mosquitos, ya que éstos tienden a desarrollarse en aguas someras, que es el caso de esta modalidad de humedales. Las zonas con mayor riesgo para el desarrollo de estos insectos son los márgenes de los humedales, por lo que es recomendable que estos márgenes se encuentren desprovistos de vegetación, o que ésta se encuentre lo suficientemente dispersa para permitir el desarrollo de organismos depredadores de las larvas de mosquito. Otra medida paliativa pasa por construir los márgenes con una mayor inclinación (3/1 o más), para reducir las zonas potenciales de desarrollo de este tipo de insectos.

> En aquellos casos en que el objetivo básico de la implantación de los humedales sea la restauración de ecosistemas, el cosechado de la biomasa tan sólo es recomendable cuando esta biomasa presente un crecimiento excesivo, que pueda llegar a impedir el buen funcionamiento hidráulico del humedal.

En este tipo de humedales, las operaciones de siega y de retirada de la biomasa seca, provocan la resuspensión de parte de la materia depositada en su fondo.

Humedales de Flujo Subsuperficial

- > Periódicamente, se procederá a la limpieza de los sistemas de distribución ubicados en cabecera de los de *Flujo Horizontal*, y sobre el sustrato en el caso de los de *Flujo Vertical*. En estos últimos la limpieza se facilita tras la siega de la vegetación.
- > Se evitará en todo momento la entrada a las instalaciones de la estación depuradora de animales que puedan emplear las especies vegetales implantadas en los humedales como alimento.
- > Se evitará, en lo posible, pisar el sustrato filtrante para evitar su compactación, lo que disminuiría su conductividad hidráulica.
- > El corte de las plantas secas, de forma manual o mecánica, y su retirada, debe hacerse finalizado el período vegetativo, si no se quiere que las partes secas caigan sobre el sustrato y liberen los nutrientes retenidos.

Dado que los rendimientos en la eliminación de nutrientes que se logran mediante la siega y retirada periódica de la biomasa vegetal de los *Humedales Artificiales* no son muy elevados, situándose por debajo del 20% en lo que al nitrógeno se refiere, y por debajo del 10% en el caso del fósforo, en ocasiones se pone en duda la necesidad de estas operaciones de mantenimiento, llegándose a aconsejar que no se lleven a cabo en climas fríos, dado el efecto de protección térmica que ejerce la vegetación.

Por el contrario, en la zona mediterránea sí se recomienda proceder al cosechado de la biomasa una vez al año, para evitar la acumulación de materia muerta (necrosoma) en el humedal, siendo aconsejable que la siega se lleve a cabo una vez pasado el periodo de posibles heladas. Esta cosecha de la biomasa permite la limpieza de los lechos y la revisión de los sistemas de alimentación-distribución (principalmente en los *HAFSs Verticales*), de los taludes, etc.

- > En todo caso, se evitará la siega de la biomasa en los periodos de nidificación de las aves que habitan en el humedal.
- > Especialmente en los primeros meses de operación de los *HAFSs* deben eliminarse las malas hierbas que hacen competencia al carrizo. Estas malas hierbas deben extraerse a mano, evitando en todo momento el uso de herbicidas.
- > Periódicamente se controlará la aparición de enfermedades en las plantas, si esto ocurre se iniciarán los pertinentes tratamientos, de acuerdo con las indicaciones del personal especializado.

Figura 52.- Siega manual de la
plantación de carrizo una vez seca.



Figura 53.- Siega mecanizada de la
plantación de carrizo una vez seca.



Figura 54.- Evacuación de la biomasa
seca tras la siega de un humedal.

Figura 55.- Evolución de la vegetación de un HAFSs tras su siega (20 Febrero 2006).



Figura 56.- Evolución de la vegetación de un HAFSs tras su siega (13 Marzo 2006).



Figura 57.- Evolución de la vegetación de un HAFSs al año de su siega.

10.3.- Seguimiento del proceso

Para comprobar el correcto funcionamiento de una estación depuradora basada en la tecnología de *Humedales Artificiales* y poder prevenir posibles anomalías, es preciso el seguimiento y control periódico de una serie de parámetros.

Se aconseja que las visitas a la estación depuradora sean diarias al objeto de detectar, lo antes posible, cualquier posible incidencia que pudiese repercutir negativamente en su funcionamiento. Para dejar constancia de sus observaciones, el operador de la estación depuradora dispondrá de un cuadernillo en el que anotará:

- La fecha y hora de la visita a la estación depuradora.
- Los caudales tratados de aguas residuales.
- El número e identificación de los *Humedales Artificiales* puestos en operación
- El aspecto de las plantas de los humedales y del efluente depurado.
- Las posibles anomalías en los viales y en la obra civil en general.
- Las fechas de realización de las diferentes tareas de mantenimiento: limpieza de rejillas, retirada de lodos en el tanque Imhoff (fosa séptica), siega y retirada de las plantas secas, etc.
- Si la estación de tratamiento está dotada de energía eléctrica para: el accionamiento de los elementos del Pretratamiento, bombeo entre humedales, riego con los efluentes depurados, iluminación, etc., se anotarán las lecturas de los contadores correspondientes.
- En el apartado de “observaciones” se registrarán cuantas incidencias se estimen oportunas sobre: las características visuales y olfativas de las aguas residuales, el posible empleo de los efluentes depurados por los agricultores de la zona, la duración de los periodos de lluvia intensa, etc.
- En el caso de que la instalación de *Humedales Artificiales* cuente con equipos electromecánicos (rejillas de desbaste de limpieza automática, caudalímetros, bombas, etc.), estos equipos dispondrán de fichas individualizadas donde se registrarán:
 - Sus características operativas.
 - Sus horas de funcionamiento.
 - El calendario de operaciones de mantenimiento.
 - Las averías sufridas.
 - Todas aquellas observaciones que sobre su funcionamiento se consideren pertinentes.

Una tarea importante que habrá de realizar el operador de la estación de tratamiento es la medición de los caudales, tanto de las aguas residuales influentes como de las aguas depuradas.

En aquellas estaciones dotadas de medidores de caudal con registro tan sólo será necesario anotar las lecturas, pero cuando se carece de estos elementos de medida será preciso recurrir a métodos: *volumen-tiempo* (determinando el tiempo que tarda en llenarse un recipiente de capacidad conocida; en el caso de instalaciones con cámaras de bombeo, deteniendo el funcionamiento de las bombas, y determinando el incremento de altura que experimenta la lámina de agua en un tiempo determinado), o a métodos *sección-velocidad* (determinando el tiempo que una mancha, producida por la adición de un colorante, tarda en recorrer la distancia entre dos pozos de registro contiguos del colector de llegada a la estación depuradora).

Independientemente del seguimiento rutinario, será necesario realizar en laboratorio el control de una serie de parámetros que permitan conocer el nivel de depuración alcanzado, con objeto de poder determinar el grado de cumplimiento de la Directiva 91/271.

En el Diario Oficial de las Comunidades Europeas de 30 de Mayo de 1991 se publicó la Directiva del Consejo 91/271, de 21 de Mayo de 1991, referente al tratamiento de las aguas residuales urbanas. La Directiva contiene estipulaciones relativas al transporte, tratamiento y descarga de las aguas residuales, siendo su objetivo la protección del medio ambiente de los efectos adversos de estos vertidos, estableciendo unos requisitos mínimos para la descarga de dichas aguas residuales.

Para aglomeraciones urbanas entre 2.000 y 9.999 habitantes-equivalentes, la Directiva establece que se efectúen a lo largo del primer año de seguimiento de la estación de tratamiento un mínimo de 12 muestreos. Las muestras se tomarán durante períodos de 24 horas, a intervalos regulares y proporcionales al caudal circulante. Del total de muestreos efectuados deberán cumplir los requisitos anteriores, en cuanto a concentración o porcentaje de reducción, un mínimo de 10. Si ésto se cumple, en años próximos el número de muestras a tomar será de 4.

La *Tabla VIII* recoge los parámetros a determinar, los requisitos de vertido (concentración/rendimiento) y los métodos analíticos a emplear.

Tabla VIII.- Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
DBO ₅ a 20°C sin nitrificación (2)	25 mg/l O ₂	70-90	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación de oxígeno disuelto antes y después de 5 días de incubación a 20°C ± 1 °C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de nitrificación.
DQO	125 mg/l O ₂	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Digestión ácida con dicromato potásico.
Total de sólidos en suspensión (3)	35 mg/l (3)(más de 10000 h.e.) (4) 60 mg/l (de 2000 a 10000 h.e.) (4)	90 (más de 10000 h.e.) (4) 70 (de 2000 a 10000 h.e.) (4)	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105°C y pesaje Centrifugación de una muestra representativa (durante 5 minutos como mínimo, con una aceleración media de 2800 a 3200 g), secado a 105°C y pesaje.
(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada			
(2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO ₅ y el parámetro sustitutivo			
(3) Este requisito es optativo			
(4) De conformidad con el apartado 2 del artículo 4			

En el caso de que el vertido final de la estación de tratamiento se realice a una zona catalogada como “sensible”, será necesario proceder también a la determinación de los contenidos en Nitrógeno y Fósforo, de acuerdo con la Tabla siguiente.

Tabla IX.- Requisitos para los vertidos procedentes de instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas realizados en zonas sensibles propensas a eutrofización. Según la situación local, se podrán aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicará el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
DBO ₅ a 20°C sin nitrificación (2)	2 mg/l (10000 - 100000 h.e.) 1 mg/l (más de 100000 h.e.)	80	Espectrofotometría de absorción molecular
Nitrógeno total (2)	15 mg/l (10000 - 100000 h.e.) (3) 10 mg/l (más de 100000 h.e.) (3)	70-80	Espectrofotometría de absorción molecular

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada

(2) Nitrógeno total equivale a la suma de nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrito

(3) Estos valores de concentración constituyen medidas anuales. No obstante, los requisitos relativos al nitrógeno pueden comprobarse mediante medidas diarias cuando se demuestre que se obtiene el mismo nivel de protección. En ese caso, la medida diaria no debe superar los 20 mg/l de nitrógeno total para todas las muestras, cuando la temperatura del efluente del reactor biológico sea superior o igual a 12°C. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales

El correcto mantenimiento de la estación depuradora y de su entorno contribuye de forma notable a minimizar el impacto que produce este tipo de instalaciones. En este mantenimiento se incluyen la conservación de la obra civil y de las conducciones, el control del buen estado del cerramiento, el cuidado de la ornamentación vegetal implantada, el control de roedores, etc.

Como norma general de obligado cumplimiento, en todas aquellas operaciones de mantenimiento en

las que el operario entre en contacto con las aguas a tratar es imprescindible el empleo de guantes desechables, y al final de dichas operaciones se deberá proceder a una limpieza a fondo de las manos y de las herramientas empleadas.

En la caseta de servicio se dispondrá de un botiquín, dotado de todo lo necesario para hacer frente a los pequeños accidentes que puedan ocurrir en el transcurso de las operaciones de mantenimiento de la depuradora.

10.4.- Anomalías más frecuentes y su solución

El principal, y más grave, problema que puede darse en la explotación de un *Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial* radica en la colmatación del sustrato, lo que tendrá su reflejo en la aparición de charcos en la superficie del humedal y en la instauración de condiciones de operación anaerobias, con la consiguiente disminución en los rendimientos de depuración y el empeoramiento del aspecto de los efluentes depurados.

Si la selección del sustrato es la adecuada, la principal causa de esta colmatación habrá que buscarla en un mal funcionamiento de los tratamientos previos (Pretratamiento y Tratamientos Primarios).

Ante un problema de estas características, y si los tratamientos previos operan correctamente, se aconseja detener la alimentación a los humedales durante unas dos semanas, para volver a reiniciarla una vez transcurrido este periodo. Este periodo de descanso permitirá la mineralización de los restos orgánicos retenidos en el sustrato filtrante, con lo que se podrá incrementar su capacidad de filtración.

En invierno es normal que mueran las hojas y los tallos de las plantas, si esto ocurriese en otros momentos del año, y no se debiese a falta de agua, la causa podría radicar en la presencia de sustancias tóxicas en las aguas a depurar, en la aparición de algún tipo de enfermedad en las plantas, o en el ataque de plagas. Estas últimas situaciones se solventarán mediante la aplicación de los adecuados tratamientos fitosanitarios.

En los *HAFSs Verticales* el correcto nivelado de la superficie del sustrato filtrante evitará la aparición de flujos preferenciales, zonas inundadas y de zonas sin riego.

11.- VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los *Humedales Artificiales*, como cualquier otro sistema de depuración de aguas residuales, presentan una serie de ventajas e inconvenientes, que pueden aconsejar o no su utilización en cada caso concreto.

11.1.- Ventajas

Entre las ventajas destacan:

- Sencillez operativa, al limitarse las labores de explotación a la retirada de residuos del pretratamiento y al corte y retirada de la vegetación una vez seca.
- Consumo energético nulo, si las aguas residuales a tratar pueden circular por gravedad hasta los humedales.
- Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos.
- En el caso de los *HAFS* y de los *HAFSs de Flujo Horizontal*, al operar con elevados tiempos de retención, se toleran bien las puntas de caudal y de carga.

- En los *HAFSs* se simplifica la gestión de los lodos que se generan en el proceso depurador, al procederse a su purga en las fosas sépticas (o tanques Imhoff), tras largos periodos de tiempo.
- Posible aprovechamiento de la biomasa vegetal generada (ornamentación, alimentación animal).
- Los *Humedales de Flujo Superficial*, principalmente, permiten la creación y restauración de zonas húmedas, aptas para potenciar la vida salvaje, la educación ambiental y las zonas de recreo.
- Mínima producción de olores, al no estar expuestas al aire las aguas a tratar en los *Humedales de Flujo Subsuperficial*, y por alimentarse con efluentes ya depurados los *Humedales de Flujo Superficial*.
- Perfecta integración ambiental.



Figura 58.- Integración ambiental de los Humedales Artificiales (Fuente: Wastewater Gardens).

11.2.- Inconvenientes

Como principales desventajas pueden citarse:

- Exigen una mayor superficie de terreno para su implantación que las Tecnologías Convencionales de depuración, lo que puede repercutir notablemente en los costes de construcción si fuese necesaria la adquisición de los terrenos.
- Larga puesta en marcha, que va desde meses hasta un año en los sistemas de *Flujo Subsuperficial* y hasta varios años en los sistemas de *Flujo Superficial*.
- Los *Humedales de Flujo Subsuperficial* presentan riesgos de colmatación del sustrato si éste no se elige convenientemente, no funcionan correctamente las etapas de pretratamiento y tratamiento primario, o si la instalación recibe vertidos anómalos con elevadas concentraciones de sólidos en suspensión o grasas.
- Pérdidas de agua por evapotranspiración, lo que incrementa la salinidad de los efluentes depurados.
- Posible aparición de mosquitos en los *Humedales de Flujo Superficial*.
- Los *Humedales Artificiales* presentan pocas posibilidades de actuación y control ante modificaciones de las condiciones operativas, por lo que es muy importante que estén bien concebidos, dimensionados y construidos.

12.- LOS HUMEDALES ARTIFICIALES EN ESPAÑA Y EN ANDALUCÍA

Si bien, a nivel mundial se cuentan por miles las instalaciones existentes de *Humedales Artificiales* para el tratamiento de aguas residuales, destacando países como: Estados Unidos, Gran Bretaña, Dinamarca, Alemania, Bélgica, Francia, República Checa, etc., en España se asiste actualmente al despegue de esta tecnología de tratamiento, como lo demuestra el hecho de que más del 80% de los *Humedales Artificiales* existentes en la actualidad (unos 40), se han construido en los últimos 5 años, siendo la modalidad más habitual de la de *Flujo Subsuperficial* (Puigagut y col., 2006).

Los rendimientos medios que se alcanzan en los *HAFSs* instalados en España se sitúan en los rangos: 70-90% en sólidos en suspensión, 80-95% en DBO_5 y 40-50% en nitrógeno y fósforo (Puigagut y col., 2006).

Estos humedales operan en un amplio abanico de cargas superficiales orgánicas, que va desde los 3,1-23,0 g $\text{DBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en el caso de los *Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal*, a los 22,8-29,8 g $\text{DBO}_5/\text{m}^2\cdot\text{d}$ en los de *Flujo Vertical* (Puigagut y col., 2006).

A nivel nacional, en la implantación de *Humedales Artificiales* para el tratamiento de las aguas residuales destaca Cataluña. La Agencia Catalana del Agua (ACA) ha optado, para el tratamiento de las aguas residuales generadas en aglomeraciones de menos de 2.000 habitantes equivalentes, por la aplicación de *Tecnologías no Convencionales*, principalmente *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal*, que en casi su totalidad están plantados con carrizo. (Robusté, J., 2004).

En la actualidad la ACA gestiona una docena de estaciones con *Humedales Subsuperficiales de Flujo Horizontal*, que en su mayoría emplean como desbaste rejillas o tamices, y como tratamientos primarios fosas sépticas o tanques Imhoff, y que tratan un rango de caudales comprendidos entre los 60 y los 400 m³/d. (Robusté, J., 2004).



Figura 59.- EDAR de Verdú, 2.000 h.e. (Lérida).



Figura 60.- EDAR de Corbins, 2.000 h.e. (Lérida).



Figura 61.- EDAR d'Alfés (Lérida).

Con relación a la implantación en Cataluña de *Humedales de Flujo Superficial* orientados a la restauración y creación de nuevos ecosistemas acuáticos, cabe destacar las instalaciones de Empuriabrava (Gerona), que presentan una superficie de 7 hectáreas y que se encuentran integradas en el Parc Natural dels Aiguamolls de l'Empordà, y la de Granollers (Barcelona), de una hectárea de extensión, que forma parte de un parque periurbano. Se construye, igualmente, un *Humedal de Flujo Superficial* en el delta del río Llobregat, que ocupará unas 17 hectáreas.

Figura 62.- Humedal Artificial de Flujo Superficial de Can Cabanyes. (Granollers, Barcelona).



En el caso de la Comunidad Andaluza, la tecnología de *Humedales Artificiales* cuenta en la actualidad con escasas referencias:

- La EDAR de La Muela (Algodonales, Cádiz), trata unos 450 h.e. y cuenta con 8 *Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal*, con una superficie total de 1.180 m².

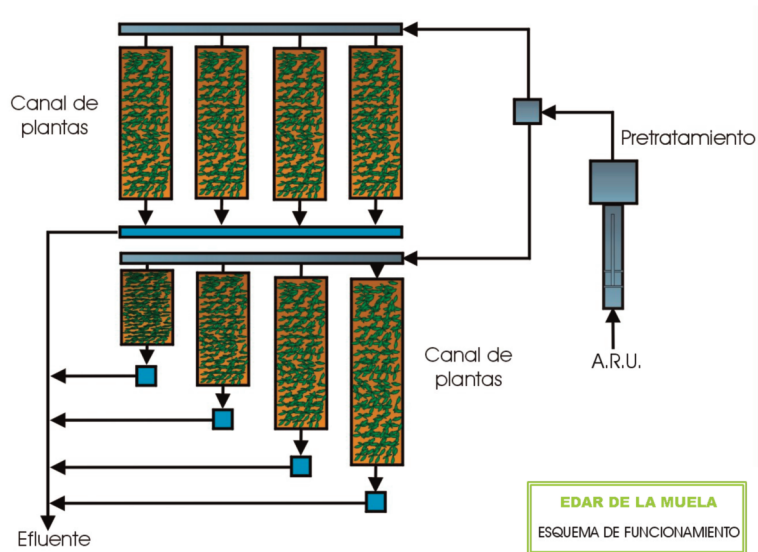


Figura 63.- Diagrama de flujo y vista de la EDAR de La Muela (Algodonales, Cádiz).



- La EDAR de Albondón (Granada) da servicio a 800 h.e. y consta de dos etapas de *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Verticales* dispuestas en serie. Las aguas residuales tras su paso por una etapa de desbaste previo, pasan a una arqueta de alimentación dotada de sifón de descarga controlada, que permite la alimentación intermitente a los tres humedales dispuestos en paralelo que constituyen la primera etapa del tratamiento, y que en su conjunto presentan una superficie de 810 m². Los efluentes de la primera etapa se recogen en una segunda arqueta, equipada igualmente con sifón, para la alimentación intermitente a los dos humedales, dispuestos en paralelo, que constituyen la segunda etapa del tratamiento, y que presentan una superficie total de 540 m².

A menor escala se encuentran los *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal* implantados en los Albergues Juveniles de Algeciras (Cádiz) y de Cortes de la Frontera (Málaga), implantados a finales de la década de los 90, con capacidades para 107 y 180 plazas, respectivamente.



Figura 64.- EDAR de Albondón (Granada) (Fuente: Akut Umweltschutz Ingenieure Burkard & Partner).



Figura 65.- EDAR del Albergue Juvenil de Algeciras (Cádiz).



Figura 66.- EDAR del Albergue Juvenil de Cortes de la Frontera (Málaga).

A nivel experimental deben mencionarse las instalaciones de GALASA (Gestión de Aguas del Levante Almeriense S.A.), humedales que actúan a modo de tratamiento terciario en las estaciones depuradoras de Mojácar-Garrucha-Turre (Lagunaje) y de Los Gallardos (Filtros de Turba), (Lahora, A., 1998).

Finalmente, la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC, Sevilla), cuya titular es la Agencia Andaluza del Agua, en el año 2005 ha potenciado notablemente las investigaciones que venía realizando sobre *Humedales Artificiales*, al haberse construido seis nuevos humedales, con una superficie total de 1.500 m², que recogen las distintas tecnologías existentes: *Humedales de Flujo Superficial*, *Humedales de Flujo Subsuperficial Horizontal* y *Humedales de Flujo Subsuperficial Vertical* (Sardón, N. y col. 2006).

El *Humedal Artificial de Flujo Superficial* se alimenta con una fracción de los efluentes depurados en un sistema de Lagunaje, al objeto de que el humedal actúe como tratamiento de afino. Las plantas seleccionadas para este humedal han sido: iris, juncos, aneas y masiega, que se han distribuido por toda la superficie del humedal.

El resto de humedales actúan como tratamiento secundario, alimentándose con los efluentes procedentes de un tanque Imhoff.

El hecho de que estos nuevos humedales se hayan construido con varios espesores de sustrato, que los sustratos empleados sean diferentes y que los

humedales puedan disponerse en distintas configuraciones serie-paralelo, permite el desarrollo de un amplio abanico de investigaciones sobre esta tecnología de tratamiento.



Figura 67.- Humedal Artificial de Flujo Superficial en la PECC.



Figura 68.- Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal en la PECC.



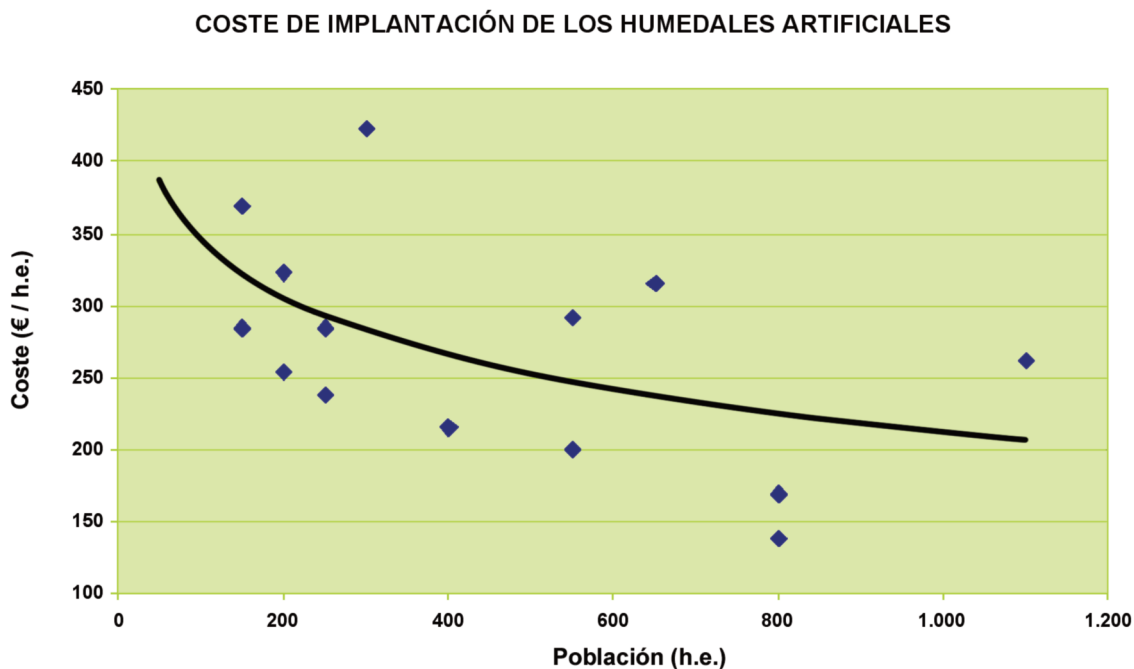
Figura 69.- Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Vertical en la PECC.

En la actualidad, y al objeto de potenciar la implantación en Andalucía de instalaciones de *Humedales Artificiales* para el tratamiento de las aguas residuales urbanas generadas en las pequeñas aglomeraciones, se está elaborando el **Plan I+D de Humedales Artificiales en Andalucía**, que se espera, que de forma similar a como en su día el **Plan I+D de Tecnologías no Convencionales** (Junta de Andalucía, 1987), contribuyó, de forma decisiva, a un mejor conocimiento de este tipo de tecnologías y a su implantación en el territorio andaluz; consolide a los *Humedales Artificiales* como una alternativa factible y sostenible para el tratamiento de los vertidos de las aglomeraciones urbanas andaluzas inferiores a los 2.000 habitantes equivalentes, que en la actualidad representa el segmento poblacional con mayores carencias en depuración de aguas, al objeto de cumplir los requisitos normativos aplicables a este tipo de poblaciones.

12.1.- Costes de implantación de los Humedales Artificiales en función del tamaño de la población servida

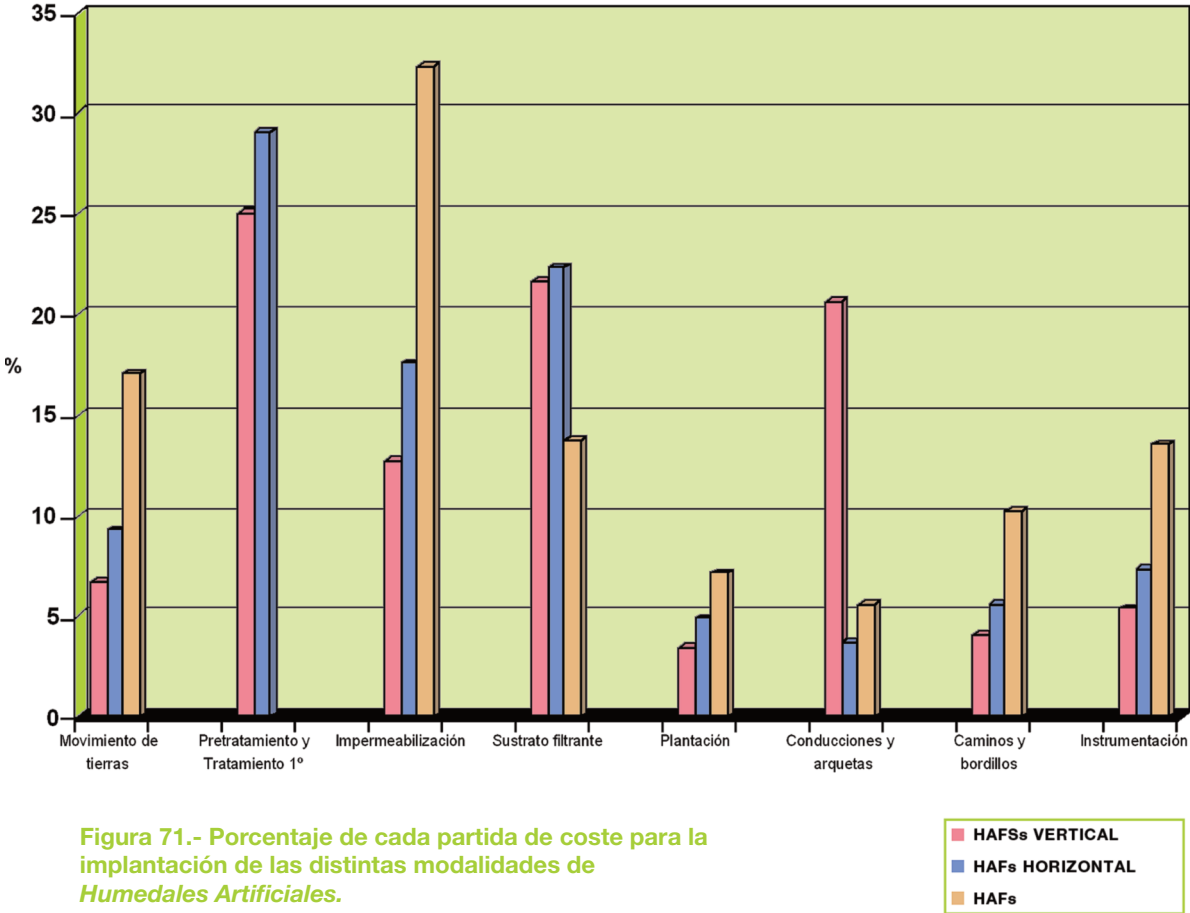
La *Figura 70* muestra la relación existente entre los costes de implantación de los *Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial*, expresados en euros/habitante equivalente, y la población equivalente servida. Los datos proceden de instalaciones portuguesas, país que en la actualidad cuenta con unas 150 instalaciones de *Humedales Artificiales* para el tratamiento de las aguas residuales urbanas (Galvao, A. y col., 2005).

Figura 70.- Costes de implantación de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial en función del tamaño de la población equivalente servida.



El reparto de las diferentes partidas que contribuyen a los costes de implantación de las diversas modalidades existentes de *Humedales Artificiales*, queda reflejado en la *Figura 71*.

REPARTO DE LOS COSTES DE IMPLANTACIÓN EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES



BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, P. (2004). Mecanismos de eliminación de la material orgánica y de los nutrientes en humedales contruidos de flujo subsuperficial. Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales contruidos. *Edic. CPET. Barcelona*, pp. 17-29.

Andrews, T. (1996). Personal communication, Ouray, CO, FWS wetlands performance data.

Arias, C. y Brix, H. (2004). Phosphorus removal in constructed wetlands: Can suitable alternative media be identified?. *Vol. 2. pp. 655-662. 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Avignon (France).*

Boutin, C. y Liénard, A. (2004). Reed bed filters for wastewater treatment in France: major design aspects and history of development. *Water 21. Abril 2004.*

Brix, H. (1993). Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Moshiri G.A. (ed.), Lewis Publishers, Boca Raton, Florida*, pp. 391-398.

Brix, H. (1994). Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives. *Wat. Sci. Tech.*, 30 (8), pp. 209-223.

Brix, H. (2004). Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. *Vol. 1. pp.1-9. 9th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Avignon (France).*

CENTA-Secretaria General de Aguas (2004). Planta Experimental de Carrión de los Céspedes. Informe 1999-2002. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.*

Comisión Europea (2003). Procesos extensivos de depuración de las aguas residuales. Adaptados a las pequeñas y medias colectividades (500 - 5.000 H. E.). *Oficina de las publicaciones oficiales de las comunidades europeas (Luxemburgo).*

Crites, R., Dombeck, G. y Williams, C. (1996). Two Birds with One Wetland: *Constructed Wetlands for Effluent Ammonia Removal and Refuse Benefits. Proceedings of WEFTEC 96, Water Environment Federation, Dallas, TX.*

Crites, R., Middlebrooks, E. y Reed, S. (2006). Natural Wastewater Treatment Systems. *CRC Press, Taylor & Francis Group.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1989). Plan de Investigación y Desarrollo de Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1991). Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Seguimiento del Plan de Investigación y Desarrollo. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1993). Seguimiento del Plan I+D Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Memoria del Segundo Año de Experimentación. Junio 91-Junio 92. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1994). Seguimiento del Plan I+D Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Memoria del Tercer Año de Experimentación. Junio 92-Junio 93. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1995). Seguimiento del Plan I+D Tecnologías de Bajo Coste para la Depuración de Aguas Residuales. Julio 1993-Diciembre 1994. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (1997). Planta Experimental de Depuración de Aguas Residuales. Evolución y Experiencias. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Dirección General de Obras Hidráulicas (2000). Planta Experimental de Carrión de los Céspedes. Nuevas Experiencias. *Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía.*

Galvao, A., Matos, J., Rodrigues, J. y Heath, P. (2005). Sustainable sewage solutions for small agglomerations. *Water Science & Technology, Vol. 52, N° 12-2005, pp. 25-32.*

García, J y Mujeriego, R. (1997). Humedales contruidos de flujo superficial para tratamiento terciario de aguas residuales urbanas en base a la creación de nuevos ecosistemas. *Tecnoambiente, 75, pp. 37-42.*

García, J., Ruiz, A, y Junqueras, X (1997). Depuración de aguas residuales mediante humedales contruidos. *Tecnología del Agua, 165, pp. 58-65.*

García, J., Aguirre, P., Barragán, J., Mujeriego, R., Matamoros, V. y Bayona, J. (2004). Effect of key design parameters factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Water Research*.

García, J., Morató, J., y Bayona, J. (2004). Nuevos Criterios para el diseño y operación de humedales construidos. *Ediciones CPET. Centro de Publicaciones de Campus Nord. Barcelona*.

Gearheart, R., Klopp, F. y Allen, G. (1989). Constructed free surface wetlands to treat and receive wastewater: pilot project to full scale. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment; Municipal, Industrial and Agricultural. D.A.Hammer, Ed. Lewis Publishing, Chelsea, MI*.

Herskowitz, J., Black, S. y Lewandowsky, W. (1987). Listowel artificial marsh treatment project. Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery. *K. R. Reddy and W. H. Smith Eds. Magnolia Publishing, Orlando, FL*.

Hoover, S. y Porges, N (1952). Assimilation of dairy wastes by activated sludge. II. The equation of synthesis and rate of oxygen utilization. *Sewage and Ind. Wastes, 24, pp. 306-312*.

Kadlec, R.H. y Knight, R.L. (1996). Treatment Wetlands. *CRC Press, Florida*.

Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P y Haberl, R. (2003). Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation. *IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control. IWA Publishing*.

Lahora, A. (1998). Humedales controlados como tratamiento terciario de aguas residuales urbanas. Conclusiones del Encuentro Medioambiental Almeriense, Recursos Hídricos. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía), Instituto de Estudios Almerienses (Diputación de Almería), Universidad de Almería, Grupo Ecologista Mediterráneo. *Ed. Rivera, J*.

Lienard, A., Boutin, C. y Esser, D. (1990). Domestic wastewater treatment with emergent hydrophyte beds in France. *Constructed Wetlands in Water pollution Control. Cooper R.E. and Findlater B.C. (ed.), Pergamon Press. Oxford, UK, pp. 183-192*.

Puigagut, J., Villaseñor J., Salas, J., Becares, E. y García, J. (2006). Subsurface constructed wetlands in Spain for sanitation of small communities: a comparative study. *10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Lisboa (Portugal)*.

Reed, S., Middlebrooks, E. y Crites, R. (1988). Natural Systems for Waste Management and Treatment. *McGraw-Hill, New York.*

Reed, S., Crites, R. y Middlebrooks, E. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2nd Edition. *McGraw-Hill, New York.*

Robusté, J. (2004). Humedales construidos en explotación, experiencia en Catalunya. Nuevos Criterios para el diseño y operación de humedales construidos. pp.89-92. *Ediciones CPET. Centro de Publicaciones de Campus Nord. Barcelona.*

Salas, J., Pidre, J., Solís, G. y Ternero, M. (2005). Mejoras en el proceso de depuración de aguas residuales urbanas mediante filtros de turba. *VI Simposio del Agua en Andalucía, tomo II, pp. 1163-1172.*

Sardón. N., Salas, J., Pidre, J. y Cuenca, I. (2006). Vertical and horizontal subsurface constructed wetlands en the Experimental Plant of Carrión de los Céspedes (Seville). *10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Lisboa (Portugal).*

Stottmeister, U., Wiessner, A., Kunschik, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Müller, R. y Moormann, H. (2003). Effects of plant and microorganisms in constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech. 48(5), pp. 191-198.*

Tanner, C. y Kadlec, R. (2003). Oxygen flux implications of observed nitrogen removal rates in subsurface-flow treatment wetlands. *Wat. Sci. Tech. 48 (5), pp. 191-198.*

Tanner, C., Sukias, J., y Upsdell, M. (1998). Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetland treating farm dairy wastewaters. *Wat. Res., 32, pp. 3046-3054.*

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1993). Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. A Technology Assessment. *EPA/832/R-93/008, USEPA Office of Water. Washington, DC.*

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1998). Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. *EPA 625/1-88/022.*

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2000). Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. *EPA/625/R-99/010, USEPA Office of Research and Development. Cincinnati, OH.*

Vymazal, J. y Masa, M. (2003). Horizontal subsurface flow constructed wetland with pulsing water level. *Wat. Sci. Tech.*, 48(5), pp. 143-148.

Vymazal, J. Brix, H., Cooper, P., Green, M. y Haberl, R. (1998). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. *Backhuys Publishers, Leiden.*

Watson, J., Reed, S., Kadleck, R., Knight, R. y Whitehouse, A. (1989). Performance Expectations and Loadings Rates for Constructed Wetlands. Hammer (ed). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. pp. 319-351. *Lewis Publishers, Chelsea, MI.*

WPCF (Water Pollution Control Federation) (1990). Natural Systems for Wastewater Treatment. *Manual of Practice. FD-16, Alexandria.*

