

Revisión Técnica de Humedales Artificiales

de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises
y aguas domésticas

Título original:	Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment
Publicado por	Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ Programa de Saneamiento Sostenible ECOSAN
Contacto:	Apartado postal 5180, 65726 Eschborn, Alemania T +49 61 96 79-4220 F +49 61 96 79-80 4220 E ecosan@giz.de www.gtz.de/ecosan
Autores:	Dra. Heike Hoffmann, Dr.-Ing. Christoph Platzer, Dra.-Ing. Martina Winker, Dra. Elisabeth von Muench
Lugar y fecha:	Eschborn, Febrero 2011
Editor Responsable:	Dra. Elisabeth von Muench
Agradecimientos:	Juergen Staeudel, Prof. Chris Buckley, Dr. Guenter Langergraber (por sus contribuciones y criticas); Prahlad Lamichhane, Cynthia Kamau, Susanne Bolduan, Christine Werner
Diseño:	Matthias Hartmann (GIZ)
Fotos:	Portada: © Heike Hoffmann, Christoph Platzer, Soeren Rued, Lukas Ulrich, Jouke Boorsma, Wolfram Sievert Contraportada: © Heike Hoffmann, Rosa Miglio, Jens Nowak, Joachim Niklas, Jouke Boorsma, Michael Blumberg
Traducción en español:	Rotaria del Perú SAC
Contacto:	Info.pe@rotaria.net
Participación:	Ing. Blanca Villafranca, Dra. Heike Hoffmann

Prefacio

Esta publicación es una importante contribución del programa de "saneamiento sostenible - ecosan" de la GIZ, al proporcionar una valiosa orientación sobre humedales artificiales para países en desarrollo y transición acerca del tratamiento de aguas residuales y aguas grises. Este programa ha sido encargado por el Ministerio Federal Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ).

El enfoque de saneamiento ecológico (ecosan) involucra dos aspectos importantes: la salud de los niños, que se puede mejorar a través de un óptimo saneamiento en los hogares, y el tratamiento de aguas residuales, con una gestión sostenible para el reciclaje seguro de recursos importantes como el agua y los nutrientes.

Para un desarrollo positivo es necesario que cada vez más personas tomen conciencia de la crisis actual del saneamiento a nivel mundial, que está matando a miles de niños cada día. Una de las causas principales es la gran cantidad de excretas y aguas residuales no tratadas que contaminan las fuentes de aguas superficiales y subterráneas donde son vertidas.

Los humedales artificiales son sistemas flexibles que pueden ser utilizados individualmente en los hogares o en comunidades enteras. Además, debido al cambio climático, cada vez más regiones están experimentando sequías o inundaciones. Por lo tanto, reciclar agua y/o utilizar tecnologías de tratamiento no convencionales son aspectos claves para la adaptación a los efectos del cambio climático.

Basados en diferentes experiencias con humedales artificiales en diversos países como Filipinas, Siria y Albania, esta tecnología es considerada adecuada para la gestión sostenible de aguas residuales. Por lo que sea segura que la presente información del documento motivará a las personas que trabajan con este tipo de solución. Los comentarios para mejorar la publicación son bienvenidos, por favor enviarlos a ecosan@giz.de.



Andreas Kanzler
Jefe de la Sección Agua
División de Agua, Energía, Transportes

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Eschborn, Alemania

Eschborn, Febrero 2011

1	Resumen	8
2	Introducción	8
2.1	Público objetivo	8
2.2	Ámbito de aplicación	8
2.3	Definición y terminología	9
2.4	Desarrollo histórico	9
2.5	Clasificación de humedales artificiales	9
2.6	Rango de aplicaciones	10
2.7	Selección de la tecnología	10
2.7.1	Criterio de selección: necesidad de área	10
2.7.2	Comparación de HHAA FS con reactores aeróbicos	10
2.7.3	Comparación de HHAA FS con lagunas facultativas	11
2.7.4	Consideraciones de los costos	11
2.8	Aspectos de reutilización	11
2.8.1	Reutilización de efluente tratado	11
2.8.2	Aspectos higiénicos (patógenos)	11
2.8.3	Aspectos de calidad del efluente tratado	12
2.8.4	Aspectos de coloración en el efluente tratado	12
3	Condiciones para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FSS).....	12
3.1	Principios del tratamiento	12
3.1.1	Procesos de tratamiento en HHAA de flujo subsuperficial	12
3.1.2	Relaciones de eliminación de los contaminantes en el tratamiento de aguas grises	13
3.1.3	Remoción de nutrientes	14
3.1.4	La tarea de las plantas en el HHAA FS	14
3.2	Consideraciones básicas de diseño	15
3.2.1	Requisitos generales	15
3.2.2	Componentes técnicos y tiempo de vida	16
3.2.3	Parámetros de diseño	16
3.2.4	Área requerida	16
3.2.5	Diferencias entre tratamiento de aguas residuales y aguas grises en HHAA FS.....	17
3.3	Sustrato utilizado en el HHAA FS.....	17
3.4	Tipos de plantas utilizadas	18
4	Pretratamiento de efluentes.....	19
4.1	Procesos principales de pretratamiento	19
4.2	Emisión de gas metano en el pretratamiento	20
4.3	Trampa de grasa	20
4.4	Tanque Séptico	21
4.5	Filtro de compost.....	21
4.6	Tanque Imhoff	22
4.7	Tanque Baffled	22
4.8	Reactor UASB (RAFA)	22
5	Principios de diseño de HA FS	23
5.1	Humedales artificiales de flujo horizontal (HFH).....	23
5.2	Humedales artificiales de flujo vertical (HFV)	25
5.2.1	Recomendaciones básicas de diseño.....	25
5.2.2	La obstrucción y la aireación del suelo en HFV	26
5.3	El sistema Francés para tratamiento primario y secundario de aguas residuales	26

5.4	Sistema híbrido.....	28
5.5	Ejemplo de proyectos.....	28
6	Operación y mantenimiento.....	29
6.1	Tareas generales de operación y mantenimiento para HHAA de flujo horizontal y vertical.....	29
6.2	Operación y mantenimiento de HHAA de flujo horizontal (FH).....	29
6.3	Operación y mantenimiento de HHAA de flujo vertical (FV).....	30
6.4	¿Las plantas de los humedales deben ser removidas o no?.....	30
6.5	Soluciones rápidas para los humedales.....	31
7	Referencias y fuentes adicionales.....	31
7.1	Documentación citada.....	31
7.2	Otras lecturas recomendadas.....	34
7.2.1	Varias publicaciones sobre humedales artificiales.....	34
7.2.2	Casos de estudio de Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA).....	34
7.3	Fotos y dibujos técnicos.....	34
8	Apéndice.....	35
8.1	Apéndice 1: Caracterización de los efluentes domésticos y aguas grises.....	35
8.1.1	Efluentes domésticos.....	35
8.1.2	Aguas grises.....	35
8.2	Apéndice 2: Patógenos y su remoción en humedales construidos artificiales.....	36
8.3	Apéndice 3: Distribución recomendada de tamaño de grano en HHAA FS.....	38

Lista de Tablas:

Tabla 1.	Procesos de remoción de contaminantes en HHAA de flujo subsuperficial.....	13
Tabla 2.	Porcentaje de remoción de los humedales de flujo horizontal (HFH) y de flujo vertical (HFV) para el tratamiento de aguas grises. Los valores son similares para el tratamiento de aguas residuales domésticas.....	14
Tabla 3.	Área requerida que depende de las condiciones climáticas para HHAA FS para aguas residuales pretratadas.....	17
Tabla 4.	Lista de algunas plantas que pueden ser utilizadas en los HHAA FS en climas cálidos.....	18
Tabla 5.	Descripción de los procesos de pretratamiento disponibles y su idoneidad para los diferentes tipos de aguas residuales: AG = aguas grises, AR = aguas residuales.....	19
Tabla 6.	Ejemplo de requisitos de área para humedales de FV (ver estudios de caso SuSanA para más detalles).....	28
Tabla 7.	Ejemplo del cálculo de las cargas de aguas grises y aguas negras para el área superficial de dos HHAA para un colegio en Lima, Perú (base de diseño de 70 PE). El texto en entre paréntesis proporciona los porcentajes de reducción.....	29
Tabla 8.	Valores típicos de los factores de carga en las aguas residuales crudas.....	35
Tabla 9.	Concentraciones típicas de microorganismos y patógenos en aguas residuales crudas domesticas.....	36
Tabla 10.	Reducción de microorganismos según e proceso de tratamiento (por logaritmo OMS 2006, vol. 2).....	37

Lista de figuras:

Figura 1. Clasificación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2008).....	10
Figura 2. Tratamiento descentralizado de aguas grises urbanas en un humedal artificial de flujo subsuperficial Klosterenga en Oslo, Noruega (foto L. Ulrich, 2008).	10
Figura 3. <i>Izquierda:</i> Efluente tratado en humedales artificiales de flujo vertical, Haran Al-Awamied-Siria. <i>Derecha:</i> Estanque antes de su reutilización para el riego agrícola (fotos E. von Muench, 2009, proyecto apoyado por GIZ).....	12
Figura 4. <i>Izquierda:</i> Agua gris pretratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de cultivos, <i>Derecha:</i> Agua negra pretratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de áreas verdes, la coloración marrón es típica en aguas residuales y es causada por los ácidos húmicos y huminas (fotos H. Hoffmann, 2008).....	12
Figura 5. De <i>izquierda a derecha:</i> Raíces y rizomas de caña (<i>Phragmites australis</i>) (fotos M. Blumberg, 1995).....	15
Figura 6. Humedal de flujo vertical (HFV) en Lima, Perú durante la prueba de bombeo para comprobarla distribución. El agua gris pretratada sale por pequeños orificios de los tubos de distribución. Los tubos fueron posteriormente cubiertos con grava. En el flujo vertical se utiliza toda la superficie como área de entrada. (foto H. Hoffmann, 2008).	16
Figura 7. HFV en Bayawan City, Philippines para tratar lixiviados de un vertedero durante su construcción; (foto J. Boorsma, 2009; proyecto apoyado por GIZ).....	16
Figura 8. Arena gruesa utilizada para un HFV para el tratamiento de aguas residuales en Brasil, arena del rio sin polvo, barro o arcilla (foto H. Hoffmann, 2009).	17
Figura 9. <i>Izquierda:</i> HFV durante la construcción, Brasil, Santa Catarina, ciudad Palhoça; geomembrana HDPE con tubos de dren en el fondo, cubiertos con grava. <i>Derecha:</i> HFV en Lima, Perú, llenado con arena (H. Hoffmann, 2007).	18
Figure 10. Carrizo (<i>Phragmites australis</i>) después de 2 años en un HA de flujo vertical, tratando aguas residuales domesticas en Haran Al-Awamied, Damasco, Siria (foto E. von Muench, 2009; proyecto apoyado por GIZ).	19
Figura 11. Papiros después 6 meses en HFV de aguas residuales domésticas de un hotel en Florianópolis, Brasil (foto C. Platzer, 2008).	19
Figura 12. Simsen (<i>Scirpus</i> sp.), HFV de aguas residuales domésticas del parque olímpico de Beijing, China (foto J. Germer, 2008).	19
Figure 13. Procesos para sacar el lodo sedimentado del pretratamiento de un HA en Tirana, Albania. El lodo se transporta con camión cisterna para su posterior tratamiento en una planta de tratamiento de aguas residuales (proyecto apoyado por GIZ, foto J. Nowak, 2010)	20
Figura 14. <i>Izquierda:</i> esquema de la trampa de grasa. <i>Derecha:</i> trampa de grasa con balde removible, antes de un humedal, para el pretratamiento de aguas grises, Lima, Perú, (esquema y foto: H. Hoffmann, 2010).	20
Figura 15. <i>Izquierda:</i> Esquema de Tanque Séptico. <i>Derecha:</i> Tanque Séptico con 3 cámaras en construcción, casa con 15 personas en Lima, Perú (esquema y foto: H. Hoffmann, 2009).	21
Figura 16. <i>Izquierda:</i> Tanque Imhoff con los 3 compartimentos. <i>Derecha:</i> Tanque Imhoff en construcción, San Martin, Perú (esquema y foto: H. Hoffmann, 2008).	22
Figura 17. Esquema de un Tanque Baffled con seis compartimentos (fuente: Gutterer et al., 2009).	22
Figura 18. Esquema de la sección transversal de un HFH (fuente: Morel y Diener, 2006).....	24
Figura 19. Esquema de la sección transversal que muestra HFH con un tanque séptico como pretratamiento a la izquierda (fuente: Fehr, 2003).....	24
Figura 20. HFH con dique de piedras en la zona de entrada que ayuda con la distribución e infiltración del agua a tratar, cerca de Leiria, Portugal (foto J. Vymazal, 2003).	24
Figura 21 <i>Izquierda:</i> Vista lateral del nivel del flujo en el HFH, se muestra el dique de entrada que controla y previene la obstrucción y escorrentía superficial de las aguas residuales. La flecha vertical izquierda indica la entrada y la flecha vertical derecha la salida del agua. <i>Derecha:</i> Vista superior de la geometría correcta de un gran HFH donde la longitud del filtro (ver las flechas verticales) es de 5-8 m, y el ancho del lecho (ver las flechas horizontales) es como máximo de 30 m (fuente: Platzer, 2000).	24
Figura 22. Esquema en corte de un HFV (Morel y Diener, 2006) con filtro de arena gruesa, grava en la superficie y en el fondo para proteger el dren.....	25
Figura 23. Esquema de la sección transversal que muestra un HFV y a la izquierda el tanque séptico como pretratamiento (fuente: Fehr, 2003).	25
Figura 24. Sistema Francés para 800 PE, de izquierda a derecha: tres HFV (filtros) para el pretratamiento y dos HFV para el tratamiento secundario en Albondón, España. La planta no necesita suministro de electricidad, ya que está construida en pendiente (foto T. Burkard, AKUT, 2005).	27
Figura 25. Esquema de la primera etapa: pretratamiento de aguas residuales crudas en el sistema Francés (fuente Molle et al., 2005). El efluente crudo sale por los tubos directamente a la superficie del humedal	27

Figura 26. Tuberías de distribución de las aguas residuales sobre el lecho de pretratamiento del sistema Francés, Albondón, España (foto T. Burkard, AKUT, 2007).27

Figura 27. HA FS en la ciudad Bayawan, Filipinas. La ruta de acceso del centro separa el HFV del HFH (foto J. Boorsma 2009, proyecto apoyado por GIZ).28

Figura 28. *Izquierda:* Mal funcionamiento de la trampa de grasa con acumulación de lodos en exceso. *Derecha:* los lodos de la trampa de grasa obstruyen la zona de infiltración del HA, el color negro se da porque no hay transporte de oxígeno lo que lleva a la obstrucción (fotos H. Hoffmann, 2009, Lima, Perú).....29

Figura 29. *Izquierda:* Limpieza de las tuberías de distribución de agua residual por medio de la apertura y cierre de válvulas durante la fase de bombeo (plantas de papiro paragua después de un proceso de replantado). *Derecha:* Tapa abierta en una tubería de distribución obstruida (fotos H. Hoffmann, 2009, Lima, Perú).30

Figura 30. Humedal artificial en Duba para tratamiento de aguas residuales, el Carrizo (*Phragmites*) puede llegar a tiene altura de 6m (foto W. Sievert, 2007).31

Figure 31. *Cyperus papyrus* después de 12 meses en un HA de flujo vertical (Brasil): Crecimiento horizontal de nuevas plantas, sin raíces verticales. Esta plantas pueden caer y no contribuyen al proceso de tratamiento (foto H. Hoffmann, 2008).31

Figura 32. Recomendaciones de distribución del tamaño del grano de arena en HHAA de flujo subsuperficial (fuente Platzer, 1998). La curva de tamizado de la arena debe estar entre las dos curvas que se indican en el gráfico.38

Lista de abreviaturas:

AG	Aguas grises
AR	Aguas residuales
C/N	Relación carbono-nitrógeno
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno después de 5 días
DQO	Demanda química de oxígeno
ecosan	Saneamiento Ecológico
FS	Flujo superficial (un tipo de HA)
GAM	Grasas, aceites y manteca
hab	habitante (= persona)
HA	Humedal artificial (en plural: HHAA)
HA FS	Humedal artificial de flujo subsuperficial
HFH	Humedal de flujo horizontal (este es un tipo de humedal de FS)
HFV	Humedal de flujo vertical (este es un tipo de humedal de FS)
MO	Materia orgánica
NT	Nitrógeno total
NTK	Nitrógeno total de Kjeldahl, suma del nitrógeno orgánico y amoniacal
N/A	no aplicable
PE	Persona equivalente (también llamado p.e.)
PT	Fósforo total
PrTr	Pretratamiento
RAFA	Reactor anaeróbico de flujo ascendente, también conocido por sus siglas en inglés como UASB
SDTAR	Sistemas descentralizados de tratamiento de aguas residuales
SS	Sólidos suspendidos
SST	Sólidos suspendidos totales

Definiciones específicas del documento:

Clima frío:	En el documento un "clima frío" significa temperaturas medias anuales inferiores a 10°C.
Clima cálido:	En el documento un "clima cálido" significa temperaturas medias anuales superiores a 20°C.
Clima moderado:	Entre clima frío y cálido.

1 Resumen

Los humedales artificiales (HHAA) desempeñan un papel importante en la descentralización de sistemas de tratamiento de aguas residuales, debido a sus características como sistemas "naturales" de fácil aplicación, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas. Un aspecto especial de gran importancia es el uso del HA para el tratamiento de aguas grises, ya que desempeña un papel importante en la integración de los conceptos de ecosan.

Mientras que el término "humedales artificiales" es utilizado para una amplia gama de tratamientos alternativos, **esta publicación se enfoca sólo en humedales artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FS), diseñados con sustrato de arena gruesa**, debido a que estos han sido ampliamente investigados, son replicables y es un sistema de tratamiento con alto potencial.

El proceso de tratamiento en HHAA se basa en una serie de procesos biológicos y físicos (adsorción, precipitación, filtración, nitrificación, depredación, descomposición, etc.). El proceso más importante es la filtración biológica, realizada por el biofilm que está compuesto de bacterias aerobias y facultativas. La eficiencia de los procesos de tratamiento aerobio dependen de la relación de demanda (carga) y suministro del oxígeno (diseño del HA). Para diseñar estos sistemas aparentemente de "tecnología sencilla" pero biológicamente complejos, son necesarios profesionales con los conocimientos del tratamiento de aguas residuales.

Además, para el diseño de los humedales se tienen que considerar siempre las circunstancias locales específicas, tales como clima (temperatura), disponibilidad de tierras y la reutilización prevista o la vía de eliminación del efluente.

Las principales tecnologías de pretratamiento que se pueden utilizar antes de filtrar el agua residual en el humedal artificial (HA) son las siguientes:

- Desarenador o sedimentador para la eliminación de arena y arenilla
- Trampa de grasa
- Filtro compostero (parasistemas a pequeña escala)
- Tanque séptico
- Tanque Baffled
- Tanque Imhoff
- Reactor anaerobio de flujo ascendente, RAFA¹ (el cual sólo se utiliza para sistemas a gran escala)

La generación de biogás no deseado (y su falta de captura) en las unidades de pre-tratamiento es un tema bastante complejo. Puesto que el uso o quema del biogás es deseable por razones de protección climática, pero en la práctica a menudo en los sistemas de pequeña escala lamentablemente esto no es económicamente viable.

Todos los tipos de HHAA pierden su capacidad de tratamiento cuando se sobrecargan por períodos prolongados de tiempo (en cambio, los picos cortos de carga son fácilmente tolerados). Esto puede ocurrir si el sistema de pre-tratamiento falla, y los sólidos suspendidos, lodos o grasas pasan al lecho del HA.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FS) pueden ser diseñados con flujo vertical u horizontal. El Humedal de Flujo Vertical (HFV) tiene un rendimiento de tratamiento más eficiente con una menor área de ocupación. Por otra parte, la eficacia del tratamiento depende del intervalo en que se da la carga (de 4 a 8 veces al día) por lo que se necesita un mayor conocimiento técnico para el diseño, en cambio la alimentación del Humedal de Flujo Horizontal (HFH) es de flujo continuo. Estos son más fáciles de diseñar y hasta ahora siguen siendo las instalaciones preferidas, especialmente en países en desarrollo.

El "sistema Francés" (Sistema de HFV) para los países en desarrollo es una opción interesante de tratamiento de aguas residuales municipales por la combinación del pre-tratamiento y tratamiento secundario. Sus requisitos de mantenimiento son muy bajos debido al eficiente pre-tratamiento sin ningún tipo de acumulación de lodos.

La aparente simplicidad del sistema a menudo lleva a la confusión de que ésta tecnología no necesita conocimientos especiales. Pero la mayoría de humedales artificiales que presentan deficiencias, se debe a los errores de diseño y/o a la falta de mantenimiento.

Siendo las tareas más importantes de mantenimiento la revisión periódica del pretratamiento, y el control del equipo técnico para la alimentación de los humedales como las bombas, la distribución uniforme en el lecho filtrante y también la carga de los afluentes. En este documento se explican las acciones necesarias para evitar la obstrucción del lecho filtrante.

Además, la intención de esta publicación es difundir conocimiento y conciencia sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial a los países en desarrollo y transición.

2 Introducción

2.1 Público objetivo

El público objetivo de esta publicación son personas que tienen conocimientos técnico básico y/o que:

- desean obtener una visión general de los HHAA de flujo subsuperficial, sus diseños, el funcionamiento y los requisitos de mantenimiento;
- desean saber si los HHAA de flujo subsuperficial podrían ser una posible opción para un problema determinado de tratamiento de aguas residuales;
- trabajan con consultores que están diseñando HHAA y por tanto, deben tener la capacidad de entender y también formular preguntas adecuadas;
- tienen un interés en soluciones de saneamiento sostenible para países en desarrollo y en transición.

2.2 Ámbito de aplicación

Este documento se centra en el tratamiento de *aguas residuales doméstica, municipales* o *aguas grises* en humedales artificiales de flujo subsuperficial con arena gruesa como material filtrante.

Mayor énfasis se da en la aplicación del sistema en países en desarrollo y en transición con un clima moderadamente

¹ El RAFA es más conocido por sus siglas en inglés como UASB.

cálido, aunque en principio los humedales artificiales pueden ser utilizados en todos los países y tipos de climas.

El presente documento **no es un manual de diseño**. Por lo que siempre será necesario consultar con un especialista para el diseño de humedales artificiales.

Los humedales artificiales son generalmente utilizados como parte de los procesos de tratamiento descentralizado de aguas residuales, industriales o grises. Se implementan principalmente como tratamiento secundario, es decir, los efluentes siempre necesitan de un tratamiento primario, que debe ser de acuerdo a las características del afluente, antes de entrar en el lecho filtrante del HA. Excepto para el "sistema Francés", donde el tratamiento primario (filtro plantado con confítillo) es parte del sistema.

Básicamente, este documento ofrece una visión general y una orientación sobre el diseño y mantenimiento de los humedales artificiales de flujo subsuperficial que pueden ser de flujo horizontal o de flujo vertical. También, incluye la descripción de los tratamientos primarios más comunes, debido a la importancia que tienen para el buen funcionamiento de los HHAA.

2.3 Definición y terminología

Los HHAA han sido definidos como "*sistemas de ingeniería, diseñados y construidos para utilizar las funciones naturales de los humedales, de la vegetación, los suelos y de sus poblaciones microbianas para el tratamiento de contaminantes en aguas residuales*" (ITRC 2003).

Otros sinónimos de "humedales artificiales" incluyen: humedales construidos, pantanos artificiales, pantanos construidos, biofiltros, y otros sinónimos locales, aunque también se utiliza el nombre en inglés: "wetland" y el nombre más completo que es "constructed wetland". Hay también términos diferentes para los Humedales Artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FSS), que incluyen:

- Filtros/ Biofiltros plantados. El término se refiere a la característica de los HHAA que siempre utilizan una vegetación de plantas macrófitas, que son naturales de humedales/o pantanales de la misma zona climática. Esta característica diferencia a los HHAA del grupo de "filtros no sembrados" (que también son llamados: biofiltros, lechos de percolación, lechos de infiltración o filtros intermitentes de arena).
- En Europa son conocidos como "reed bed treatment system" (RBTS) cuya traducción al español sería "Sistema de Tratamiento en Lecho de Caña", debido a que una especie vegetal frecuentemente utilizada es el carrizo (*Phragmites australis*).
- En los EE.UU estos sistemas también son denominados como "Lechos de Plantas Emergentes" (VSB, por su siglas en inglés). "Plantas emergentes" son un tipo de macrófitas cuyas hojas están por encima del nivel del agua, y crecen en humedales naturales.
- Este gran número de términos hace que la literatura se fragmente y confunda al principiante que está en la búsqueda de información.

En este documento, los términos "filtro" o "lecho filtrante" son utilizados indistintamente y denotan que el lecho principal del humedal es de arena, lo cual posibilita una filtración activa con procesos mecánicos y biológicos.

El término "pretratamiento" es utilizado para referirse a la etapa de tratamiento de aguas residuales crudas, antes de entrar en el lecho filtrante del HA FS. Otros autores llaman a este paso "tratamiento primario", y el tratamiento en el HA en ese caso es llamado "tratamiento secundario".

2.4 Desarrollo histórico

Históricamente, los **humedales naturales** fueron utilizados como sitios de descarga de las aguas residuales. Esto se dio principalmente como medio de eliminación, mas no como tratamiento. Esta tendencia fue llevando a muchos humedales, tales como pantanos, a saturarse de nutrientes y posteriormente a degradarse ambientalmente.

La primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales en **humedales artificiales** fue realizada por el Dr. Seidel en 1952 en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania (Seidel, 1965). En la década del '90 hubo un mayor aumento del número de HHAA debido a la ampliación de tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales (domésticas, industriales y aguas pluviales).

El uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales es cada vez más aceptado en diferentes partes del mundo. Hoy en día los humedales de flujo subsuperficial son comunes en muchos países desarrollados (ej. Alemania, Inglaterra, Francia, Dinamarca, Polonia, Italia, etc.), siendo también apropiados para los países en desarrollo, solo que aún faltan ser más conocidos (Medina, 2004; Heers, 2006; Kamau, 2009).

2.5 Clasificación de humedales artificiales

Los HHAA se clasifican por el régimen del flujo del agua: **humedal artificial de flujo superficial** (HA FS) y **humedal artificial de flujo subsuperficial** (HA FSS), (ver Figura 1); y por el tipo de las plantas macrófitas. Los humedales artificiales siempre utilizan plantas macrófitas, que son plantas acuáticas que crecen en o cerca al agua.

Los diferentes tipos de humedales artificiales pueden ser combinados entre sí (los llamados sistemas híbridos) con el fin de explotar las ventajas específicas de cada sistema.

El tema de este manual es exclusivamente los **humedales artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FS)**. Estos están diseñados para mantener el nivel de agua totalmente por abajo de la superficie del lecho filtrante. Esto evita los problemas con la proliferación de insectos.

Entre los HHAA FS hay dos tipos diferentes de material de relleno: arena o grava. Los sistemas de lecho con grava son ampliamente utilizados en América Latina, África, Asia, Australia y Nueva Zelanda. Los sistemas de lecho con arena tienen su origen en Europa, pero hoy en día son utilizados en todo el mundo. El uso de arena gruesa contribuye a la eficiencia de los procesos de tratamiento, proporcionando la superficie para el crecimiento microbiano y soportando la adsorción y los procesos de filtración. Estos efectos dan una mayor eficiencia al tratamiento, necesitando menos espacio. En esta publicación sólo se tratarán los **HHAA de flujo subsuperficial con arena gruesa de medio filtrante**.

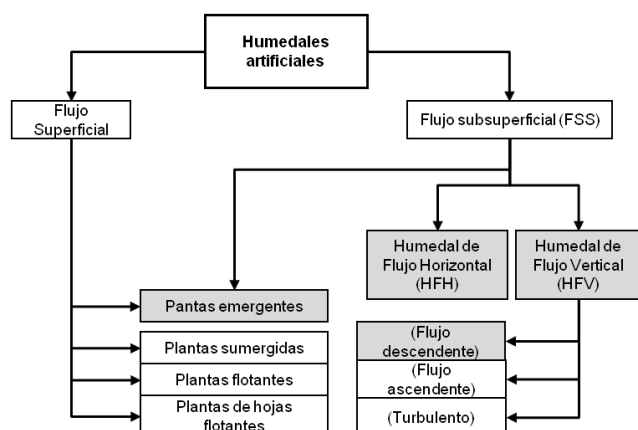


Figura 1. Clasificación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2008)

Los puntos del esquema representan el enfoque del documento (HFH y HFV son abreviaturas para humedales de flujo horizontal y vertical, respectivamente). Los sistemas híbridos también son posibles.

2.6 Rango de aplicaciones

Los humedales artificiales pueden ser utilizados para una variedad de aplicaciones²:

1. Tratamiento de aguas residuales municipales
2. Tratamiento de agua residuales domésticas o aguas grises
3. Tratamiento terciario de efluentes pretratados en plantas convencionales de aguas residuales
4. Tratamiento de aguas residuales industriales (como lixiviados de rellenos sanitarios, compost, tratamiento de lodos, desechos de refineries de petróleo, drenaje ácido de minas, desechos agrícolas, efluentes de fábricas de pulpa y de papel o fábricas textiles)
5. Tratamiento y retención de aguas pluviales
6. Tratamiento natural para agua de piscinas (sin cloro)
7. Tratamiento natural de ríos y lagos contaminados

Esta publicación se enfoca en los primeros dos puntos de la lista anterior y en estos casos siempre es necesario un pretratamiento (tratamiento primario) antes del humedal.

2.7 Selección de la tecnología

Los HA FS tienen un alto potencial para la descentralización de los tratamientos de aguas residuales o aguas grises, sin embargo no son la única tecnología. La tecnología de tratamiento siempre debe ser cuidadosamente seleccionada teniendo en cuenta una serie de aspectos³.

² Para una visión general de esta aplicación ver la siguiente presentación en inglés: <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1035>.

³ Ver el documento de visión de la Alianza de Saneamiento Sostenible (SuSanA) para una definición de los indicadores de sostenibilidad para el saneamiento (<http://www.susana.org/lang-en/intro/156-intro/267-vision-document>).



Figura 2. Tratamiento descentralizado de aguas grises urbanas en un humedal artificial de flujo subsuperficial Klosterenga en Oslo, Noruega (foto L. Ulrich, 2008).

2.7.1 Criterio de selección: necesidad de área

El uso de los humedales artificiales puede limitarse por la necesidad de disponer de áreas relativamente grandes o por el volumen de arena gruesa, especialmente en zonas urbanas. Pero las aplicaciones descentralizadas de estos sistemas pueden ser suficientemente pequeñas como para caber en los espacios urbanos disponibles.

En climas cálidos los humedales flujo horizontal (HFH) tienen el mismo requerimiento en superficie que las lagunas facultativas mientras que los humedales de flujo vertical (HFV) necesitan 20% menos espacio que las lagunas aproximadamente.

Una alternativa para ahorrar espacio en áreas urbanas puede ser la construcción de los HHAA FS sobre los techos de los edificios. Aunque en la práctica actualmente esta solución tiene una gran cantidad de inconvenientes, pero en el futuro, esta podría ser una área de investigación bastante interesante. Más información se proporciona en la sección 3.2.4 sobre el área requerida de los HHAA FS.

2.7.2 Comparación de HHAA FS con reactores aeróbicos

Los reactores de tratamiento aerobio tienen una capacidad similar de tratamiento al de un humedal artificial, pero con menor área, se citan algunos ejemplos: filtro percolador, disco rotativo, filtros sumergidos, reactores de lodo activado con decantadores o con membranas.

El principal argumento para los humedales artificiales en este caso son los costos relativamente bajos de mantenimiento y la estabilidad de operación, hechos que son muy importantes para los países en desarrollo.

Otro aspecto importante es que los humedales artificiales no producen lodo. A menudo, las plantas técnicas aerobias se caracterizan por la alta tasa de producción de lodo secundario y este lodo debe ser retirado, tratado y depositado adecuadamente. Mientras que en los países en desarrollo, estos lodos muchas veces son descargados de forma incontrolada al medio ambiente, dando lugar a problemas de contaminación y la salud.

Además los humedales artificiales son muy eficaces para las plantas de tratamiento de aguas residuales como unidad de tratamiento terciario, por ejemplo después del tratamiento de lodos activados o filtro percolador⁴:

- Los humedales artificiales sirven como filtro de retención, compensando temporalmente las variaciones de la calidad del efluente, que son típicos en el tratamiento de reactores más compactos.
- Los humedales artificiales también eliminan patógenos – incluso más que los procesos convencionales de tratamiento aerobio (ver sección 8.2 del apéndice).

2.7.3 Comparación de HHAA FS con lagunas facultativas

Los humedales artificiales y las lagunas son sistemas que tienen alta puntuación en la fiabilidad y simplicidad del proceso, ya que no requieren de equipos especiales. Los principales argumentos para elegir los HHAA FS y no las lagunas son:

- Los HHAA FS tienen superficies libres de agua, por esto tampoco se fomenta la cría de mosquitos.
- Los HHAA FS producen agua clara, mientras que las lagunas tienen una alta producción de algas que influyen en la calidad de los efluentes y complican su reutilización.
- Los humedales artificiales con buen funcionamiento no tienen problemas de olores, mientras que es común que en muchas lagunas se generen malos olores.
- Las lagunas son mucho más difíciles de integrar en un barrio, en particular a uno urbano, por la superficie de aguas abiertas y la posibilidad de atraer mosquitos y mal olor.
- Los humedales artificiales no producen lodos, aunque pueden ser producidos en la etapa del pretratamiento. En cambio, en las lagunas el lodo se acumula a lo largo del tiempo, y tiene que ser eliminado después de 6 a 12 años. Esta actividad generalmente no se realiza, especialmente en los países en desarrollo y se suele abandonar el lugar de las lagunas

¿Cuáles son las ventajas de las lagunas sobre los HHAA FS? Las lagunas de tratamiento son más fáciles de diseñar y construir, no necesitan un sustrato (arena) y tienen menores costos de inversión, especialmente para plantas a gran escala (ver sección 2.7.4).

2.7.4 Consideraciones de los costos

Los costos de inversión de los HHAA FS dependen en gran medida del costo de la arena, pues el lecho del humedales llenado de arena gruesa que debe estar libre de limo. Si es necesario la arena se tiene que lavar. En segundo lugar los costos de inversión dependen también del costo del terreno.

Las decisiones financieras de los procesos de tratamiento de agua residual no solo deben hacerse con los costos de inversión, sino también con el valor neto presente o los costos de toda su vida útil, que incluyen los costos anuales de operación y mantenimiento.

Cuando se comparan los costos de humedales artificiales con los procesos de tratamiento aerobios se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

- Los humedales artificiales, a diferencia de las plantas de tratamiento aerobio de alta carga, no representan economías de escala. Para plantas pequeñas de hasta 500 PE, los humedales artificiales son generalmente más económicos, pero humedales artificiales más grandes, suelen ser más caros relativamente en términos de costos de inversión.
- Los humedales artificiales tienen costos de operación y mantenimiento significativamente más bajos comparándolos con los procesos de tratamiento aerobio de carga alta por el uso de energía y el tiempo de operación.

Para plantas de tratamiento a gran escala de más de 10 000 personas equivalentes (PE), y en zonas donde los terrenos son económicos, las lagunas tienen un menor costo de inversión que los humedales artificiales. Pero existen otros aspectos que deben considerarse a la hora de tomar la decisión entre los dos procesos de tratamiento, como se indicó líneas arriba.

El criterio de los costos de inversión debe ser menos importante que la fiabilidad y la sostenibilidad a largo plazo de la planta de tratamiento, incluyendo su sustentabilidad financiera, que está fuertemente influenciada por la operación y los costos anuales de mantenimiento.

2.8 Aspectos de reutilización

2.8.1 Reutilización de efluente tratado

Los HHAA FS tratan las aguas residuales de manera uniforme, tanto para descargar las en las aguas superficiales como para reutilizar las en diversas aplicaciones, de acuerdo a los lineamientos de la OMS (OMS, 2006). Los requerimientos legales para la calidad de los efluentes varían dependiendo de los reglamentos específicos de cada país y también de la reutilización prevista o vía de eliminación. El diseño del HA FS debe asegurar la calidad deseada del efluente para su eliminación o reutilización.

El tipo de reutilización más común es el riego, usándose muchas veces riego tecnificado: por goteo o subterráneo para césped, zonas verdes o la producción de cultivos. En este caso se aprovechan los nutrientes contenidos en las aguas residuales en lugar de eliminarlos.

Existen lineamientos que se deben seguir para asegurar que esta práctica sea higiénicamente segura para los consumidores de los cultivos, así como para los trabajadores que están en contacto permanente con las aguas residuales tratadas. Las normas internacionales para la reutilización y una explicación del concepto de múltiples barreras se pueden encontrar en la OMS (2006).

2.8.2 Aspectos higiénicos (patógenos)

En el tracto intestinal humano existen bacterias, conocidas como bacterias coliformes, que son evacuadas junto con las heces. Las bacterias coliformes normalmente no son patógenas, pero su presencia en aguas o suelo indica la probabilidad de presencia del material fecal. Si el ser humano está infectado o es portador de alguna enfermedad que se transmite por el agua, estos agentes patógenos también se encuentran en las heces (excretas) e infectan a otras personas. Las bacterias coliformes son usadas como indicadores de contaminación.

⁴ Después de un tratamiento secundario la carga orgánica que entra en el HA es menor, por lo que el requerimiento de área se reduce significativamente para el HA.

Por lo general las aguas grises que han sido tratadas en el HA FS no necesitan de ningún tratamiento adicional para cumplir con los nivel de patógenos permitidos para una descarga segura del agua a la superficie. En el caso de aguas residuales domésticas, y dependiendo del tipo de reutilización, puede ser necesaria la desinfección en un tratamiento terciario.

Más información sobre los tipos de patógenos y su eliminación en diferentes procesos de tratamiento se puede ver en el Apéndice N° 2.



Figura 3. *Izquierda:* Efluente tratado en humedales artificiales de flujo vertical, Haran Al-Awamied-Siria. *Derecha:* Estanque antes de su reutilización para el riego agrícola (fotos E. von Muench, 2009, proyecto apoyado por GIZ).

2.8.3 Aspectos de calidad del efluente tratado

En climas cálidos los humedales de flujo horizontal podrían perder todo el contenido del agua residual debido a la evapotranspiración. Por esto, cuando se hace el diseño se debe tener en cuenta el balance hídrico. Cuanto mayor sea la superficie mayor serán los efectos de precipitación (lluvia) y de evapotranspiración, especialmente en climas cálidos y secos.

Si es el objetivo reutilizar el agua y su pérdida en el tratamiento se considera como problema, es preferible construir humedales de flujo vertical a los de flujo horizontal, ya que tienen una capa superior no saturada y un tiempo de retención más corto que el HFH.

2.8.4 Aspectos de coloración en el efluente tratado

El efluente de aguas residuales en cualquier proceso de tratamiento biológico, tal como los humedales artificiales, puede tener un color medio amarillo o marrón debido a las sustancias húmicas, como ácidos húmicos o huminas (ver Figura 4). Esta coloración puede reducir la aceptación de la reutilización de las aguas residuales por razones estéticas.

Los ácidos húmicos son la fracción no biodegradable proveniente de la degradación biológica de la materia orgánica. Se encuentran naturalmente como compuestos del suelo, lagos y agua del río. No son perjudiciales para el

medio ambiente, pero tienen un impacto negativo en los procesos de desinfección con cloro o radiación ultravioleta.

Su remoción no es obligatoria, pero se puede conseguir solo con tecnologías avanzadas como carbón activado, ozono, oxidación foto catalítica (Guylas et al., 2007; Abegglen et al., 2009). Para disimular el efecto visual cuando las aguas residuales tratadas son utilizadas para la descarga del baño, se recomienda usar inodoros con porcelana de color.

De las experiencias de los autores, el agua gris después de ser tratada en un humedal artificial generalmente no tiene coloración. Por otro lado, el agua residual doméstica o aguas negras después del tratamiento en un humedal artificial a menudo, aunque no siempre, tienden a presentar un poco de color amarillo o marrón (ver ejemplo en la Figura 4).



Figura 4. *Izquierda:* Agua gris pretratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de cultivos, *Derecha:* Agua negra pretratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de áreas verdes, la coloración marrón es típica en aguas residuales y es causada por los ácidos húmicos y huminas (fotos H. Hoffmann, 2008).

3 Condiciones para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FSS)

3.1 Principios del tratamiento

3.1.1 Procesos de tratamiento en HHAA de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales son generalmente diseñados para la eliminación de los siguientes contaminantes en aguas residuales (ver detalles en la Tabla 1):

- Materia orgánica (medida como DBO₅ y DQO, Demanda Biológica o Demanda Química de Oxígeno)
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Nutrientes⁵ (por ejemplo nitrógeno y fósforo)
- Patógenos, metales pesados y otros contaminantes

Los HHAA son referidos a menudo como "simples sistemas de baja tecnología", pero los procesos implicados en este tratamiento están en realidad muy lejos de ser simples. Las

⁵ La eliminación de nutrientes no es necesaria cuando las aguas residuales tratadas son reutilizadas para el riego (ver sección3).

actividades ocurren en diferentes zonas dentro del "lecho del filtro", siendo los siguientes componentes del sistema:

- Lecho de arena
- Zona radicular
- Detritus (material orgánico particular, como hojas secas)
- Poro de agua
- Poro de aire
- Plantas
- Raíces
- Biofilm: bacterias que crecen en la arena y están ligadas a las raíces

El proceso de tratamiento en el lecho de los HHAA es el resultado de complejas interacciones entre todos estos componentes. Debido a esto, los humedales artificiales (HA) tienen diferentes espacios con condiciones de oxígeno que desencadenan los diversos procesos de oxidación y reducción de los contaminantes biodegradables.

Tabla 1. Procesos de remoción de contaminantes en HHAA de flujo subsuperficial.

Contaminante	Proceso
Materia orgánica (MO) (medida como DBO ₅ o DQO)	<ul style="list-style-type: none"> • Las partículas de MO son eliminadas por la sedimentación y filtración, luego convertidas a DBO₅ soluble • La MO soluble es fijada y adsorbida por el biofilm y degradadas por las bacterias adheridas en este.
Sólidos suspendidos totales (SST)	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación y filtración • Descomposición durante los largos tiempos de retención por bacterias especializadas en el lecho de arena.
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrificación / Desnitrificación por el biofilm • Absorción de las plantas (influencia limitada)
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> • Retención en el lecho de arena (adsorción) • Precipitación con aluminio, hierro y calcio • Absorción de las plantas (influencia limitada)
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación y filtración • Absorción por el biofilm • Depredación por protozoarios • Eliminación de bacterias por condiciones ambientales desfavorables (temperatura y pH)
Metales pesados	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitación y adsorción • Absorción de las plantas (influencia limitada)
Contaminantes orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Adsorción por el biofilm y partículas de arena • Descomposición debido a lo largo del tiempo de retención y a las bacterias especializadas del suelo (no calculable)

El lecho del humedal actúa como filtro mecánico y biológico. Los sólidos suspendidos y los sólidos microbianos generados en el afluente son principalmente retenidos mecánicamente, mientras que la materia orgánica soluble, es principalmente fijada o absorbida por el biofilm. Toda la materia orgánica se degrada y se estabiliza dentro del lecho durante períodos prolongados de los procesos biológicos. El tratamiento biológico en el lecho del humedal se basa en la actividad natural de los microorganismos, principalmente de las bacterias aerobias y facultativas, que crecen en el biofilm y que se adhieren en la superficie de las partículas de arena y raíces.

Los HHAA FS están diseñados para degradar la materia orgánica por tratamientos aerobios y anóxicos, pero no por tratamientos anaerobios, que sólo se producen en ausencia de oxígeno y nitrato y liberan biogás. Los procesos aerobios siempre necesitan de la presencia del oxígeno (aire), mientras que los procesos anóxicos se dan en condiciones de ausencia del oxígeno cuando el nitrato (NO₃⁻) es utilizado por ciertas bacterias que son capaces de desnitrificar y degradar la materia orgánica.

La presencia de zonas extensas anaeróbicas (negras) en humedales, es un problema serio operacional, pues se obstruyen los poros del material filtrante y se acumula agua en la superficie. Humedales que entran en condiciones anaeróbicas no mantienen su eficiencia. Siempre se deben eliminar las causales que generan este problema.

Comparado con otros sistemas de tratamiento los HHAA tienen baja carga, lo que posibilita la degradación de los contaminantes que son difíciles de degradar biológicamente. En el lecho se encuentran las bacterias especializadas que son naturales de los suelos, que crecen muy lento pero se mantienen en el sistema natural. Todo el material orgánico, Sólidos Suspendidos como también la biomasa alimentan el proceso de degradación biológica, para finalmente reducirse por los procesos aeróbicos y anóxicos biológicos, resultan componentes inorgánicos como CO₂, H₂O, NO₃ y N₂.

También los componentes que no son biodegradables, como los metales pesados pueden ser fijados, hasta cierto nivel, en el lecho de filtración. Las plantas también pueden contribuir a la captación de los metales pesados. La razón fisiológica por la cual las plantas puedan absorber los metales pesados aún no es claro y probablemente depende fuertemente de la especie de la planta, pero hay que tener en cuenta que los metales pesados no desaparecen, sino, permanecen en el cuerpo de la planta. Se debe tener claro que los metales pesados no son un problema de las aguas residuales domésticas ni en las aguas grises.

3.1.2 Relaciones de eliminación de los contaminantes en el tratamiento de aguas grises

Las eficiencias de remoción del tratamiento de las aguas grises en los dos tipos de HHAA FS se resumen en la Tabla 2. Es evidente que en los humedales de flujo vertical y en los de flujo horizontal existen diferentes relaciones de eliminación de los diferentes parámetros. La relación de eliminación de la DBO₅ y los SST son hasta un 99%, mientras que la remoción total del nitrógeno el porcentaje es menor, hasta en un 40% (pero superior en los sistemas híbridos). Se puede esperar que los valores del tratamiento de aguas residuales domésticas sean similares.

Las concentraciones de los contaminantes en el efluente se pueden calcular comparando las concentraciones del flujo afluente al filtro (es decir, después del pre-tratamiento) con la proporción de remoción.

Tabla 2. Porcentaje de remoción de los humedales de flujo horizontal (HFH) y de flujo vertical (HFV) para el tratamiento de aguas grises. Los valores son similares para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Contaminantes	HFH (Morel y Diener, 2006)	HFV (Ridderstolpe, 2004)
DBO ₅	80-90%	90-99%
SST (Sólidos totales)	80-95%	90-99%
NT (Nitrógeno total)	15-40%	30%
PT (Fosforo total)	Las tasas de eliminación del fósforo dependen de las propiedades del material del filtro, de la longitud y del tiempo durante el cual el humedal ha estado operando.	

3.1.3 Remoción de nutrientes

El crecimiento de las plantas conduce a la eliminación de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo: La reducción de amoníaco y fosfato de las aguas residuales domésticas por el crecimiento de las plantas es alrededor del 10-20% durante el período de vegetación. Sin embargo los procesos más importante para la eliminación del nitrógeno son la nitrificación /desnitrificación, procesos llevados a cabo por las bacterias.

Remoción del nitrógeno:

- HFH: Si el transporte de oxígeno en el humedal es limitado, la nitrificación también será limitada. En cambio, la desnitrificación puede ser muy eficiente, incluso con niveles muy bajos de carbono en relación al nitrógeno (Platzer, 1999). El nitrato producido se puede reducir en condiciones de anoxia por bacterias heterotróficas de nitrógeno (N₂), a esto se le conoce como desnitrificación.
- HFV: Con suficiente suministro de oxígeno, en el humedal de flujo vertical, el amoníaco puede ser oxidado por bacterias autotróficas en nitrato, proceso conocido como nitrificación. Una nitrificación casi completa que se alcanza con la oxidación del amoníaco al 90% es comúnmente reportado en HFV. Sin embargo la nitrificación depende en gran medida del suministro de oxígeno. Para el dimensionamiento es fundamental calcular el consumo de oxígeno en el humedal (Platzer, 1999; Cooper, 2005; Platzer et al., 2007.). Por otra parte, el HFV no proporciona una buena desnitrificación, ya que el nitrógeno se mantiene como nitrato en el efluente, siendo la relación de eliminación del nitrógeno total solo alrededor de un 30%.
- Combinación: Cuando se requiere eliminar el nitrógeno, a menudo se utiliza una combinación de un HFV, seguido de un HFH con recirculación del flujo. Para más detalles ver la sección 5.4.

Remoción de fosforo:

La mayoría de los HHAA no son diseñados para la eliminación de fósforo, y menos en los países en desarrollo, ya que generalmente el fósforo no es un elemento obligado a ser removido. La eliminación del fósforo no es tan importante, en estos países, comparado con el riesgo para la salud de la descarga del agua residual sin tratar. Si el exceso de fósforo, en la recepción de los cuerpos de agua tales como lagos y ríos, se convierte en un problema importante la primera medida a tomar podría ser la prohibición de

detergentes que contengan fósforo, como se ha hecho por ejemplo en Suiza.

Aún no ha sido desarrollado un modelo fiable para la eliminación del fósforo, aunque muchos de los HHAA FS presentan una tasa relativamente alta de eliminación del fósforo durante un período determinado (Rustige y Platzer, 2001). La eliminación del fósforo se puede conseguir en los HHAA por adsorción y precipitación, y una pequeña cantidad es captada por el crecimiento de las plantas.

Los autores estiman que es posible remover hasta un 10% el fósforo por el crecimiento de las plantas; pero esto también depende del tipo de clima, de plantas, de aguas residuales, etc. La capacidad de unión química del fósforo, así como la eficiencia de remoción del fósforo, disminuye durante la vida útil del HA FS. Esto debido a los sitios de adsorción limitados de la arena.

Si la eliminación del fósforo es necesaria, se puede utilizar aguas abajo del HA FS un filtro independiente de suelo sin plantar, donde el sustrato puede ser reemplazado una vez alcanzada su capacidad de adsorción del fósforo. El intercambio del sustrato es teóricamente posible en los HHAA FS pero en la práctica no es económicamente viable.

3.1.4 La tarea de las plantas en el HHAA FS

Las plantas macrófitas, que se encuentran comúnmente en los humedales naturales o riberas de los ríos de la región, son utilizadas en los HHAA FS. Las plantas son una parte esencial de un humedal artificial⁶. Además son estéticamente agradables y añaden verdor a la zona edificada, sirven de hábitat para los animales como pájaros y ranas, y actúan localmente como "espacio verde".

El aspecto más importante en HHAA es su capacidad de mantener o restablecer la conductividad hidráulica del lecho filtrante por ser plantado, solamente a través de una fase de recuperación. En los filtros sin plantas el suelo tiene que ser tratado para recuperar su conductividad hidráulica, por ejemplo, sacando la capa superficial del sustrato.

Las plantas también juegan un papel importante en el proceso de tratamiento. Proporcionan un ambiente apropiado para el crecimiento microbiano y mejoran significativamente la transferencia de oxígeno a la zona de raíces, que es parte del lecho filtrante. Por otra parte, en las zonas de clima frío el material vegetal muerto proporciona una capa aislante, que en invierno tiene un efecto positivo para el funcionamiento del HA FS.

Por ejemplo, en el caso de la caña, existe una red masiva de raíces y rizomas⁷, que mantienen una alta actividad biológica en el humedal, debido a la capacidad de transporte de oxígeno desde las hojas hasta las raíces (ver Figura 5). Para el HFH una distribución uniforme de las raíces en todo el lecho filtrante es importante, mientras que para un HFV la

⁶ Existen otros tipos de sistemas de tratamiento que tienen algunas similitudes con los HAA FS, pero trabajan sin plantas, estos sistemas se denominan "filtros de suelo sin plantar" - para tener más detalles sobre estos consulte la documentación correspondiente, ya que no se incluyen en este documento.

⁷ Un rizoma es un tallo subterráneo con varias yemas que crece de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos. (fuente: www.wikipedia.org).

distribución uniforme de las raíces sólo es esencial en la capa superior (los primeros 10 cm).

Las características de las plantas como papiro o bambú, los cuales se adaptan a las condiciones de crecimiento temporalmente sumergidos de los humedales naturales, son probablemente similares. Sin embargo, en el caso del bambú sus raíces pueden crecer tanto que puede llegar a destruir el revestimiento de la base del humedal artificial.

En resumen, los efectos de las plantas que contribuyen al proceso de tratamiento en los HHAA FS son:

- El sistema de raíces mantiene la conductividad hidráulica del sustrato de arena gruesa.
- Las plantas facilitan el crecimiento de las colonias de bacterias y otros microorganismos que forman un biofilm adherido a la superficie de las raíces y a las partículas del sustrato.
- Las plantas naturales de humedales tienen la capacidad de transportar oxígeno a la zona de raíces lo que permite que estas plantas sobrevivan en condiciones de inundadas. Parte de este oxígeno está disponible para los procesos microbianos, aunque la contribución exacta sigue siendo un punto de discusión



Figura 5. De izquierda a derecha: Raíces y rizomas de caña (*Phragmites australis*) (fotos M. Blumberg, 1995).

3.2 Consideraciones básicas de diseño

3.2.1 Requisitos generales

Los requisitos generales para poder utilizar los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales son:

- Al ser un "sistema de baja carga" debe tener suficiente espacio disponible ya que requiere de un mayor espacio que los sistemas convencionales (ver sección 2.7.1).
- Es preferible climas que no tengan períodos largos de heladas, sin embargo adaptando el diseño los HHAA FS trabajan bien en climas fríos (Jenssen et al., 2008).
- Se recomienda tener condiciones totales de luz solar, no debe ocurrir que el humedal este completamente en sombra. Para los HHAA FS es importante que el área superficial pueda secarse regularmente por completo, pues de lo contrario, en condiciones de humedad el riesgo de obstrucción aumenta debido al crecimiento excesivo del biofilm.

- Las plantas utilizadas deben estar adaptadas: para crecer parcialmente sumergidas y al clima local donde se ubicará el humedal en condiciones de luz y de sombra.
- Las aguas residuales con tratamientos biológicos no deberían ser tóxicas, sin embargo, los HHAA por su alto tiempo de retención y baja carga son los más resistentes a los eventos tóxicos que los sistemas convencionales.
- Es necesario capacitar al personal de mantenimiento sobre las tareas básicas que se necesitan realizar en la operación del sistema.

Para el diseño del tratamiento de las aguas residuales en HA se debe considerar en el cálculo al caudal futuro de la urbanización conforme al desarrollo de la población que se tiene esperado.

Adicionalmente hay algunas consideraciones generales sobre la construcción de HHAA FS:

- Es recomendable dejar unos 15 cm de borde libre para eventuales eventos de acumulación de agua.
- La superficie debe ser horizontalmente plana para evitar una distribución desigual por escorrentía superficial (lo cual significaría, para el caso de flujo horizontal, que el agua residual fluya por la superficie del humedal hacia la salida, sin recibir tratamiento).
- El **diseño del área de entrada y de las tuberías de distribución** (especialmente para los HFV) deben asegurar la distribución uniforme del agua a tratar, sin permitir que se creen obstrucciones en el flujo.
 - Es fundamental hacer la correcta selección del material filtrante (ver detalles en la sección 3.3)
 - Las aguas residuales son vertidas en el lecho del filtro a través de tuberías de distribución que tienen pequeños agujeros colocados uniformemente a lo largo de toda su longitud.
- Las **tuberías de drenaje** colectan las aguas tratadas en la parte inferior, por debajo del lecho filtrante.
- **Impermeabilización de la base:** para el revestimiento del fondo del humedal se utiliza geomembrana HDPE⁸ (o PVC), también es posible impermeabilizar con una capa de arcilla o una base de concreto (ver Figura 9). Para el HFH la impermeabilización siempre es necesaria, en cambio para el HFV solo será necesaria cuando el efluente se quiera reutilizar o cuando el nivel freático sea alto, también puede suceder que las autoridades exijan el sellado de las bases.
 - El revestimiento evita el contacto de las aguas residuales con aguas subterráneas, pero no mejora la calidad del tratamiento, ni evita la obstrucción.
 - Las desventajas de la impermeabilización son los costos adicionales que se generan, al tener la dificultad en encontrar un proveedor local (especialmente en las zonas rurales). Además la producción del PVC genera contaminación y se necesita contratar a especialistas que coloquen correctamente la geomembrana en el fondo del humedal y peguen la membrana con el tubo de dren, que es más difícil con material PE⁹.

Los detalles sobre el diseño de los HHAA FS se dan en la sección 5. Hay que tener en cuenta que siempre es importante dar la atención debida al sistema de pretratamiento (ver sección 4).

⁸ High-density polyethylene (HDPE).

Es español es PEAD (Polietileno de alta densidad)

⁹ Polietileno.

3.2.2 Componentes técnicos y tiempo de vida

Los componentes técnicos principales de los humedales artificiales son:

- Bomba para las aguas residuales (se conoce comercialmente como bomba sumergible de lodos). La bomba es necesaria para el HFV, ya que su alimentación en pulsos es esencial, mientras que para el HFH no siempre es necesaria. El HFH puede ser alimentado continuamente, necesitando solo un desnivel entre la salida del pretratamiento y la entrada del humedal.
- Tubos de PVC, debidamente perforados para una distribución uniforme.
- Revestimiento plástico al menos debajo de la tubería de drenaje (o total),
- Grava y arena sin polvo (o arena lavada).

El tiempo de vida del humedal diseñado está determinado por el tiempo de vida de sus componentes principales. Si es necesario tanto las bombas como las tuberías pueden ser fácilmente cambiadas. En cambio, **la arena y la grava en la práctica nunca son cambiadas**. El tiempo de vida de la geomembrana es difícil de predecir y mientras esta en uso es imposible evaluar sus condiciones. Para la geomembrana de PVC es importante que los bordes no queden expuestos al sol, ya que el sol la maltrata. En cambio la geomembrana HDPE es mucho más resistente y sostenible.

No existen indicios de que un humedal artificial deje de remover materia orgánica, nitrógeno o patógenos después de un periodo de tiempo determinado¹⁰. Incluso si un humedal artificial fuese abandonado, el espacio podría ser fácilmente utilizado para otro propósito, o simplemente dejar que las plantas crezcan de manera silvestre.

Los humedales artificiales pueden tener como expectativa una vida útil tan larga como otros sistemas de tratamientos de desagües, tales como procesos aeróbicos de alta carga o lagunas de tratamiento. Algunos humedales han estado en funcionamiento continuo por más de 20 años y aún siguen funcionando.

3.2.3 Parámetros de diseño

Existen varios parámetros de diseño para HHAA FS, los cuales son usados en diferentes puntos del cálculo, dependiendo del tipo de agua residual a tratar y el clima del lugar.

- Área por persona en m²/PE, donde PE significa persona equivalente;
- Carga orgánica por área superficial en g DBO₅/m²/d o g DQO/m²/d;
- Carga hidráulica en mm/d o m³/m²/d;
- Oferta y demanda de oxígeno (kg O₂/d)

Un modelo de diseño que utilice el tiempo de retención para definir el tamaño de los humedales artificiales de Flujo subsuperficial (HHAA FS) no es comúnmente aceptado.

La mejor manera de minimizar el tamaño (superficie requerida) de un humedal artificial es un eficiente pretratamiento (ver sección 0) que disminuye significativamente la carga orgánica. La carga orgánica que entra en el HA (en

g/d) es igual al caudal del afluente (m³/d) multiplicado por la concentración de DBO₅ o DQO (en mg/L) de las aguas residuales que son pre-tratadas.



Figura 6. Humedal de flujo vertical (HFV) en Lima, Perú durante la prueba de bombeo para comprobarla distribución. El agua gris pretratada sale por pequeños orificios de los tubos de distribución. Los tubos fueron posteriormente cubiertos con grava. En el flujo vertical se utiliza toda la superficie como área de entrada. (foto H. Hoffmann, 2008).



Figura 7. HFV en Bayawan City, Philippines para tratar lixiviados de un vertedero durante su construcción; (foto J. Boorsma, 2009; proyecto apoyado por GIZ).

3.2.4 Área requerida

El parámetro de diseño simplificado para HHAA es el área requerida por persona, pero este parámetro **por sí solo no es** suficiente para el correcto dimensionamiento del humedal artificial. Este parámetro solo puede ser utilizado para tener una aproximación inicial del área requerida (Ver sección 5 para información más detallada del diseño)

La Tabla 3 muestra como el clima y el tipo de humedal (HFH contra HFV) influyen en el área requerida. Esta tabla puede ser utilizada como guía y debe ser interpretada de la siguiente manera: si un humedal artificial es menor que el valor recomendado en la Tabla 3, entonces puede ocurrir una situación de sobrecarga que podría causar serios problemas operacionales y reducir la calidad del tratamiento. Si por lo contrario el humedales mayor al área dada, es probable que este sobredimensionado. Un humedal sobredimensionado no tiene problemas de eficiencia en el

¹⁰ La situación es diferente para la eliminación del fósforo, ver la sección 3.1.3.

tratamiento y son más resistentes, pero son innecesariamente más largos y costosos.

Para dar un ejemplo: un humedal artificial de flujo vertical (HFV) para tratar las aguas residuales de 3000 personas necesita cerca de 3000 a 12000 m², dependiendo del clima y el diseño. Un humedal artificial de flujo horizontal (HFH) necesita al menos dos veces más de área.

Es preciso señalar que el requerimiento de pretratamiento es igual para ambos casos (HFH y HFV). Sin embargo, el pretratamiento de *aguas residuales* es diferente al pretratamiento de *aguas grises*, así como también difieren las características de las aguas residuales (para más detalles ver la sección 4).

Tabla 3. Área requerida que depende de las condiciones climáticas para HHAA FS para aguas residuales pretratadas¹¹.

Área requerida	Clima frío, temperatura media anual < 10°C		Clima caliente, temperatura media anual > 20°C	
	HFH	HFV	HFH	HFV
Por persona atendida (m ² /PE)	8	4	3	1.2

3.2.5 Diferencias entre tratamiento de aguas residuales y aguas grises en HHAA FS

Las aguas residuales domésticas y las aguas grises tienen características diferentes, las cuales tienen que tomarse en cuenta al momento de dimensionar un HA. Las características de las aguas residuales domésticas y grises se describen en el anexo.

Las principales diferencias entre el diseño de HHAA para el tratamiento de aguas grises en comparación con el tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales son:

- **Nitrógeno y fósforo** tienen muy bajas concentraciones en las aguas grises debido a que no tienen orina ni heces, por esto no se necesita considerarla eliminación de estos nutrientes en el diseños de tratamiento de aguas grises
- **Patógenos:** su eliminación tampoco es considerada en el diseño del tratamiento de aguas grises ya que tiene niveles muy bajos, pero su eliminación es de importante consideración para aguas residuales domésticas.

3.3 Sustrato utilizado en el HHAA FS

El parámetro más importante en el diseño del HA FS es la permeabilidad del sustrato. La correcta selección es en relación a la carga hidráulica y orgánica. La mayoría de problemas en el tratamiento se originan cuando la permeabilidad del sustrato no es la correcta para la carga aplicada.

Esta publicación se refiere únicamente a la utilización de **arena gruesa** como sustrato para la filtración. Según los autores este es el sustrato más adecuado en el tratamiento de aguas residuales o aguas grises para los países en desarrollo o países en transición (con clima cálido hasta templado).

Para los HHAA de flujo horizontal o vertical, el lecho filtrante de arena gruesa debe ser sin polvo. Este tipo de arena se encuentra por ejemplo en los ríos (ver Tabla 8), y de no encontrar un material limpio, la arena debe ser lavada.

El lecho de arena tiene un espesor de 40 a 80 cm, que es la parte biológicamente activa del filtro. El espesor depende del objetivo de tratamiento. El humedal de flujo horizontal utiliza un espesor menor que el humedal de flujo vertical.

Solo en los HHAA FS los tubos de entrada y de salida son cubiertos con 10 a 20 cm de grava. En el humedal de flujo horizontal no siempre se utilizan tubos, pero sí se debe llenar totalmente con grava o piedra una longitud de 50 cm en todo el ancho de entrada y salida. La capa de grava no contribuye al proceso de filtración, pero sí a la distribución. Su función es proteger el área de entrada, distribuyendo efectivamente el agua que entra en el humedal y evitando su acumulación en la superficie, mientras que en la salida la grava asegura que la arena del lecho filtrante se mantenga dentro del humedal y que no se pierda con el efluente.

Tanto en el HFH como en el HFV los poros de la grava en la salida deben corresponder a la granulometría de la arena en el filtro, si se utiliza una grava muy gruesa (o piedras) puede ser recomendable proteger el filtro de arena con una capa adicional de grava que sea más fina.



Figura 8. Arena gruesa utilizada para un HFV para el tratamiento de aguas residuales en Brasil, arena del río sin polvo, barro o arcilla (foto H. Hoffmann, 2009).

No es recomendable utilizar una separación de tela o membrana textil entre las capas de arena y grava. Existen malas experiencias en algunos HHAA en Alemania, tanto en HFH y HFV, ya que la tela llevó a la obstrucción de la zona de arena que fue imposible revertir.

Tampoco es recomendado construir el lecho filtrante (área activa) con diferentes tamaños granulométricos de la arena. Por ejemplo, no se debe usar granos grandes en la parte superior (HFV) o en la parte inicial (HFH) y después granos pequeños en la base (HFV) o la parte final (HFH) - ya que este enfoque de diseño ha llevado al mal desempeño de los humedales artificiales de flujo subsuperficial en el pasado.

¹¹ Si la unidad de pre-tratamiento reporta la misma concentración en el efluentes valores para el tratamiento de aguas grises son los mismos (cuando el cálculo se hace sobre una base por persona la unidad de pretratamiento puede ser más pequeña para aguas grises).

A continuación se dan algunas recomendaciones sobre el sustrato a utilizar en el diseño de HHAA FS:

- La arena debe tener una capacidad hidráulica (valor kf) aproximado de 3,10 a 4,10 m/s.
- El espesor de la capa de filtración de la arena debe tener unos 40 a 80 cm.
- La distribución granulométrica recomendada para el sustrato se muestra en la Figura 32.
- El sustrato no debe contener arcilla, limo, ni otro material fino, además no debe tener bordes afilados. La Tabla 8 ilustra la apariencia visual de la arena adecuada.



Figura 9. *Izquierda:* HFV durante la construcción, Brasil, Santa Catarina, ciudad Palhoça; geomembrana HDPE con tubos de dren en el fondo, cubiertos con grava. *Derecha:* HFV en Lima, Perú, llenado con arena (H. Hoffmann, 2007).

3.4 Tipos de plantas utilizadas

Para la selección de plantas que se utilizarán en humedales artificiales pueden hacerse las siguientes recomendaciones:

- Usar especies locales, autóctonas y no importaciones exóticas o especies invasoras.
- Usar especies de plantas que crecen naturalmente en los humedales o riberas de los ríos debido a que sus raíces ya están adaptadas a crecer en condiciones de agua saturada.
- Son preferibles las plantas con raíces extensas y sistema de rizomas subterráneos (ver Figura 5).
- Las plantas deben ser capaces de soportar altas cargas, así como cortos periodos de sequía. **Las plantas no requieren de inundaciones permanentes**, pero deben ser capaces de afrontar temporadas de inundación y encharcamiento del suelo.

Respecto a que las plantas de los humedales deban o no ser podadas se hace un comentario en la sección 6.4 como parte de las tareas de operación.

Las plantas utilizadas en los HHAA FS en climas fríos de Europa, Australia y América del Norte incluyen, por ejemplo:

- Carrizo (*Phragmites australis*): esta es la planta más utilizada en Europa y en países con un clima frío.

- Junco (*Typha latifolia*), gramínea Gliceria acuática (*Glyceria máximos*), caña de alpiste (*Phalaris arundinacea*) y lirio amarillo (*Iris pseudacorus*).

Las plantas típicamente utilizadas en HHAA FS para los climas cálidos de América del Sur, África y Asia se resumen en la Tabla 4. Todas las plantas mencionadas son plantas macrófitas, a excepción del vetiver que es una hierba perenne. Existen otras opciones de plantas que se pueden ver, por ejemplo en Brisson y Chazarenc (2009).

Tabla 4. Lista de algunas plantas que pueden ser utilizadas en los HHAA FS en climas cálidos.

Nombre de la Planta	Características	Desventajas
Papiro Egipcio (<i>Cyperus papyrus</i>)	Decorativo (ver Figura 11).	Altura 4 m, las raíces sólo se forman a partir de la planta madre.
Papiro paraguíta (<i>Cyperus albobristatus</i>)	Son plantas resistentes, excelentes para altas cargas o sales del agua residual.	
Papiro enano (<i>Cyperus haspens</i>)	Excelente cuando es la única planta.	No sobrevive a la sombra de las plantas más grandes.
Bambú, pequeñas especies ornamentales	Decorativo.	De crecimiento lento, especialmente en los 3 primeros años y si la planta no está bien adaptada al clima.
Espadaña de hoja ancha (<i>Typha latifolia</i>)	A menudo son más resistentes en condiciones de calor que la caña.	
Especies de género <i>Heliconia</i> : <i>Canna</i> : <i>Zantedeschia</i> : Calla lily	Decorativo Conocido con el nombre ave del paraíso, platanera silvestre	Algunas plantas de estas especies prefieren condiciones de media sombra y otras de plena luz solar.
Pasto de Napier o hierba de elefante (<i>Pennisetum purpureum</i>)	Especie gramínea nativas de las praderas tropicales de África.	Tiene una productividad muy alta en el forraje del ganado así como para la producción de biocombustibles.
Vetiver <i>Chrysopogon zanioides</i> , antiguamente conocido como <i>Vetiver zizanioides</i>	Crece hasta 1,5 m de altura y forma un sistema radicular eficiente. Este pasto se utiliza en climas cálidos para el control de erosión y para la producción de esencia de aceite, destilado de sus raíces. También se utiliza como planta de forraje o como material de artesanía.	Las raíces no crecen tan bien cuando las plantas son utilizadas para el tratamiento de aguas residuales en HHAA, pero aún son eficientes para mantener la funcionalidad de un HFV. Por lo tanto, el vetiver se recomienda sólo para HFV, pero no para HFH.



Figure 10. Carrizo (*Phragmites australis*) después de 2 años en un HA de flujo vertical, tratando aguas residuales domésticas en Haran Al-Awamied, Damasco, Siria (foto E. von Muench, 2009; proyecto apoyado por GLZ).



Figura 11. Papiros después 6 meses en HFV de aguas residuales domésticas de un hotel en Florianópolis, Brasil (foto C. Platzer, 2008).



Figura 12. Simsen (*Scirpus* sp.), HFV de aguas residuales domésticas del parque olímpico de Beijing, China (foto J. Germer, 2008).

4 Pretratamiento de efluentes

4.1 Procesos principales de pretratamiento

Los humedales artificiales son opciones de tratamiento secundario ya que los sólidos en suspensión, las partículas más grandes como el papel higiénico y otros desechos, así como un poco de materia orgánica, deben ser retenidos en un paso anterior para que las aguas residuales puedan ser tratadas en los HHAA FS. La tecnología utilizada para el tratamiento previo (también llamado tratamiento primario) depende del tipo y cantidad de agua residual. La Tabla 5 ofrece una visión general.

El tratamiento primario es muy importante para evitar la obstrucción del HA FS, que es la obstrucción de los poros debido a la acumulación de sólidos (para más detalles ver sección 5.2.2).

En esta sección sólo se proporciona una guía general sobre los procesos de pretratamiento. Para el diseño de la unidad de pretratamiento se debe consultar a expertos locales o literatura especializada. Consulte, por ejemplo Gutterer et al. (2009) para las ecuaciones del diseño de los tanques sépticos, tanques Baffled y tanques Imhoff.

Las pequeñas plantas de tratamiento (menos de 1 000 PE) se diseñan generalmente sin rejas. En este caso, los tanques sépticos, tanques Baffled o tanques Imhoff llevan la función de eliminar los sólidos por procesos de sedimentación. Alternativamente se puede optar por el filtro de compostaje que elimina los sólidos reteniéndolos en un lecho de pajas.

Alrededor del 60% de los sólidos suspendidos en el agua residual se eliminan en la fase del pretratamiento. Como regla básica, el objetivo es tener **menos de 100 mg/L de SST** en el afluente del HA FS (es decir, después de pretratamiento).

Tabla 5. Descripción de los procesos de pretratamiento disponibles y su idoneidad para los diferentes tipos de aguas residuales: AG = aguas grises, AR = aguas residuales.

Tipo de pretratamiento	AG con baja carga	AR o AG con alta carga	Número de habitantes atendidos	Producción de biogás
Rejas	X ¹²	X	> 1 000	No
Desarenador	X	X	> 1 000	No
Trampa de grasa	X	X	casa	No
Filtro de compost	–	X	hasta 100	No
Tanque séptico	–	X	5-200	Si
Tanque Baffled	–	X	200-2 500	Si
Tanque Imhoff	–	X	500-20 000	Si
UASB (RAFA)	–	X	> 5 000	Si

¹² (X: se puede utilizar).



Figure 13. Procesos para sacar el lodo sedimentado del pretratamiento de un HA en Tirana, Albania. El lodo se transporta con camión cisterna para su posterior tratamiento en una planta de tratamiento de aguas residuales (proyecto apoyado por GIZ, foto J. Nowak, 2010)

4.2 Emisión de gas metano en el pretratamiento

En los procesos de pretratamiento el lodo se elimina por sedimentación, acumulándose en el fondo del tanque (ver Tabla 5), después el efluente pasa para su tratamiento principal (o secundario) al humedal. Dependiendo del tipo de pretratamiento el lodo sedimentado se puede degradar parcialmente en un proceso anaerobio, este proceso emite biogás, que contiene alrededor del 66% de metano¹³. El metano (CH₄) en la atmósfera de la tierra es un gas de efecto invernadero con bastante impacto en el calentamiento global, 25 veces mayor en comparación con el CO₂ durante un período de 100 años¹⁴.

Desafortunadamente la carga orgánica en las aguas residuales domésticas no son suficientemente altas como para tener un uso rentable del biogás que podría ser usado en la cocina, la iluminación o la calefacción. Además, a veces la distancia entre el punto de generación y el punto de utilización es bastante lejana. Cuando el biogás no es reutilizado debería al menos ser quemado ("incinerado").

Cuando el biogás tiene que ser quemado, hay costos adicionales en el equipo de seguridad. Los quemadores en una planta familiar tiene casi los mismos costos que una en una gran planta de 20 000 habitantes, por lo tanto los costos específicos por persona son relativamente altos para quemadores implementados en pequeños sistemas.

Debido al hecho de que los Tanques Sépticos, Tanques Baffled, Tanques Imhoff y UASB (RAFA) dan lugar a emisiones de biogás y a que los quemadores no son económicos a pequeña escala, el diseñador debe tener en cuenta el impacto negativo sobre el cambio climático de estos métodos de pretratamiento.

Se recomienda comprobar siempre la posibilidad de quemar el biogás o de utilizar otros métodos disponibles de

¹³ Ver también revisión de tecnologías de la GIZ en materia de saneamiento del biogás: <http://www.gtz.de/en/themen/umwelt-infrastruktur/wasser/9397.htm>

¹⁴ Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Metano>.

pretratamiento que no produzcan biogás. Los sistemas de pretratamiento anaerobio deben ser diseñados para minimizar, tanto como sea posible, las emisiones de los gases de efecto invernadero (metano), aunque estas sean relativamente pequeñas a comparación con las emisiones de estos gases en otros procesos de pretratamiento.

4.3 Trampa de grasa

Las grasas, aceites y mantecas (GAM) son removidos en una trampa de grasa colocada abajo del lavadero de la cocina debido a que estos materiales flotan, al ser más ligeros que el agua. La salida del fregadero y / o la entrada de la trampa de grasa debe estar equipada con una pantalla removible que conserva los restos de la comida y la arena.

La capa de grasa flotante tiene que ser removida periódicamente antes de que sea tan densa que pueda combinarse con el efluente de la trampa de grasa. La frecuencia de limpieza depende de la utilización de grasa.

Para las unidades familiares, se pueden comprar trampas comerciales de plástico con cubetas extraíbles que (ver Figura 14) simplifican la limpieza. Las trampas de grasa más grandes (más de 20 PE) se deben limpiar con bomba.

Otras recomendaciones sobre las trampas de grasa incluyen:

- Los métodos más comunes para el pretratamiento de aguas residuales domésticas (como el tanque séptico) también eliminan una parte de las GAM. Pero, en los grandes restaurantes y cocinas, es importante tener una trampa de grasa, debido a que las grasas concentradas pueden causar problemas en el sistema, así como la obstrucción de la red de alcantarillado. Las trampas de grasa reciben si efluente solo de los lavaplatos.
- Si la trampa de grasa es el único pre-tratamiento de las aguas grises, antes de entrar en el HA, puede que sea necesario adicionar un tanque de sedimentación o tener una salida en la parte inferior de la trampa. Esto permitiría la eliminación de los lodos sedimentados formados de la arena, el jabón y pedazos de alimentos que de alguna manera podrían entrar en el humedal.
- La grasa eliminada tiene que ser tratada, por ejemplo, en un compostaje o transportada por un camión cisterna a una planta de tratamiento centralizado, si hay uno cerca. El alto valor energético de las GAM significa que la nata removida también podría ser utilizada para la digestión anaerobia (producción de biogás).

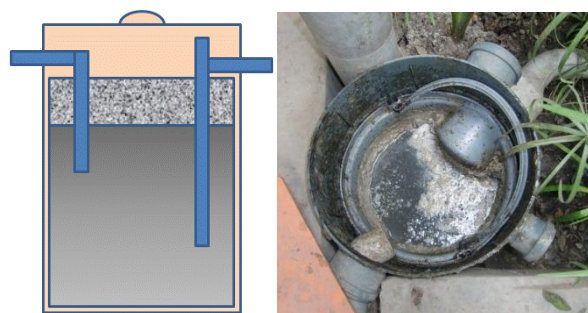


Figura 14. *Izquierda:* esquema de la trampa de grasa. *Derecha:* trampa de grasa con balde removible, antes de un humedal, para el pretratamiento de aguas grises, Lima, Perú, (esquema y foto: H. Hoffmann, 2010).

4.4 Tanque Séptico

Algunos factores básicos acerca de los tanques sépticos se mencionan a continuación:

- Son ampliamente utilizados para el tratamiento descentralizado ("in situ", saneamiento sin reutilización) de aguas residuales domésticas, debido a la fácil construcción. Muchos países tienen normas para el diseño del tanque séptico.
- Son comunes en muchos países en vías de desarrollo y también en las regiones escasamente pobladas de los países desarrollados.
- Pueden ser utilizados para el pre-tratamiento de aguas residuales domésticas de 5 a 200 habitantes.
- Constan de dos o tres cámaras (ver figura 14) que tienen una profundidad de 1,4 m o más desde la tubería de entrada.
- Las cámaras están hechas de concreto o son instaladas de tanques plásticos prefabricados.
- En climas cálidos, los tanques sépticos son diseñados para un tiempo de retención hidráulica de 1-2 días. En climas fríos, pueden ser necesarios más de 5 días.
- El proceso de tratamiento se basa en la sedimentación y la flotación de la grasa, con una degradación parcial anaerobia de los lodos. Este proceso conduce a las emisiones no deseadas de biogás (ver sección 4.2).

En un sistema de tres cámaras, la primera cámara está diseñada para el 50% del volumen total. A la segunda cámara se conecta en un nivel de 60-80 cm por encima del fondo del tanque. Con este arreglo, los sólidos sedimentan y las espumas flotantes son retenidas principalmente en la primera cámara. La tercera cámara se utiliza como depósito para las aguas residuales pretratadas.

Los tanques sépticos deben ser limpiados regularmente, al menos cuando el lodo de la primera cámara está por rebosar. El tiempo para el vaciado varía de acuerdo al diseño y al número de usuarios, pero puede estar en el rango de 1 a 5 años.

Los lodos fecales removidos deben ser adecuadamente removidos y tratados, pero desafortunadamente a menudo son simplemente descargados en cualquier parte del ambiente. El lodo fecal sin tratamiento adicional al del tanque séptico no puede ser reutilizado.

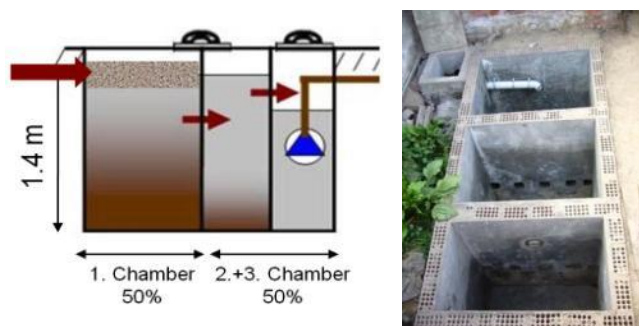


Figura 15. *Izquierda:* Esquema de Tanque Séptico. *Derecha:* Tanque Séptico con 3 cámaras en construcción, casa con 15 personas en Lima, Perú (esquema y foto: H. Hoffmann, 2009).

4.5 Filtro de compost

Un "filtro de compost"¹⁵ es un método de pre-tratamiento que se utiliza particularmente cuando hay un deseo de evitar las emisiones de biogás o cuando se pueden separar los efluentes de aguas negras y aguas grises. El filtro de compost se recomienda solo para el tratamiento de aguas negras¹⁶ que provienen de los inodoros y son altamente concentradas con sólidos y materia orgánica. Hasta ahora este proceso aerobio sólo se ha utilizado para viviendas individuales o de hasta 100 PE, por ejemplo en proyectos de saneamiento ecológico (Gajurel et al., 2004; Hoffmann, 2008; Hoffmann et al., 2009).

La función de los procesos se da de la siguiente forma:

- Las aguas negras crudas pasan por una **cesta de filtro** hecha de material plástico que está **dentro de una cámara**, la cual es airada por un tubo de ventilación.
- El efluente líquido atraviesa el filtro de compost y es colectado en otra cámara ubicada por debajo de las cestas. Los filtros de compost tienen una pérdida de altura de aproximadamente 1,5 m, por lo que el líquido sin sólidos debe ser bombeado a los HHAA.
- Los componentes sólidos de las aguas negras, es decir, las excretas, comida y papel higiénico, son retenidos en una **cama de paja** que es contenida por la cesta. Una vez a la semana hay que adicionar paja seca para obtener una adecuada relación carbono/nitrógeno (C/N), y además ayudar al filtro en su rol de material poroso que mejora la aireación del compost.
- Siempre se utilizan, de manera alternada, dos cestas separadas. Las dimensiones de una cesta deben ser como máximo de 150L. Para 10 usuarios este volumen se llena en 6 meses. Durante el tiempo en el que se utiliza la segunda cesta se da la fase de reposo de la primera cámara donde el sólido retenido se compostea, aproximadamente por 6 meses. En este tiempo la reducción de volumen puede ser hasta de un 75%.

El producto final, después de seis meses de haber sido bien oxigenado y sin nueva adición de material seco, se parece al humus negro, sin embargo, el material todavía necesita de más tratamiento, que puede ser por ejemplo en otra unidad de compostaje que eleve la temperatura del material removido, ya que todavía contiene patógenos tales como los huevos de helmintos (ver sección 2.8.2).

Las ventajas de los filtros de compost:

- De acuerdo con la amplia experiencia de los autores principales el efluente del filtro de compost no tiene olores desagradables.
- No hay producción de biogás, ya que es un proceso aerobio. Esta es una ventaja por las razones descritas en la sección 4.2.

Las desventajas de los filtros de compost:

- Estas unidades necesitan mayor mantenimiento que otros métodos de pretratamiento.
- Su uso se limita a pequeñas unidades.

¹⁵ Para más información sobre el compostaje del material fecal revisar tecnologías de GIZ inodoros de compostaje: <http://www.gtz.de/en/themen/umwelt-infrastruktur/wasser/9397.htm>.

¹⁶ Las aguas negras son sólo la descarga del inodoro (es decir, la orina, las heces y el agua utilizada para el arrastre hidráulico del sanitario).

- Los filtros de compost sólo se recomiendan para aguas negras que son altamente concentradas, porque de otro modo los sólidos retenidos en la cesta pueden ser lavados con el exceso y flujo continuo de aguas grises.
- El filtro se puede obstruir si los poros de cesta son muy pequeños, (problema de mala selección) mala selección.

En general, el proceso funciona confiablemente en climas cálidos, pero al parecer tiene menor eficiencia en climas fríos, según las experiencias en Linz, Austria y Berlín, Alemania.

4.6 Tanque Imhoff

El tanque Imhoff es un sistema de compartimentos divididos, en el compartimento superior los líquidos se separan de los sólidos para pasar al tratamiento principal, por ejemplo a un humedal, mientras los lodos sedimentados se tratan anaeróticamente en el compartimento inferior del mismo tanque. El tanque Imhoff puede ser utilizado en climas moderado a fríos. Se trata de un sistema compacto y eficiente para el pretratamiento de las aguas residuales domésticas de 500 hasta 20 000 habitantes. Elimina del agua residual cruda un 30-40% de la materia orgánica.

El tanque Imhoff está diseñado por tres compartimentos:

1. Sección inferior para la digestión de lodos
2. Compartimento superior para la sedimentación
3. Conducto del gas

El lodo sedimentado se trata anaeróticamente, se estabiliza en este proceso, y debe ser removido periódicamente. Puede ser secado o mineralizado y después utilizado en la agricultura, siempre y cuando se consideren los aspectos de higiene y se tomen las precauciones de seguridad pertinentes (ver sección 2.8.2).

El proceso en el tanque Imhoff libera más biogás del que se produce en los tanques sépticos, porque la degradación del lodo es mucho más completa, pero desafortunadamente la carga orgánica de las aguas residuales domésticas comúnmente no es suficientemente alta como para un uso económico o la combustión del biogás.

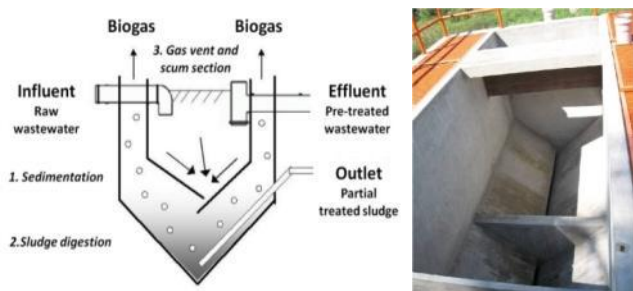


Figura 16. *Izquierda:* Tanque Imhoff con los 3 compartimentos. *Derecha:* Tanque Imhoff en construcción, San Martín, Perú (esquema y foto: H. Hoffmann, 2008).

4.7 Tanque Baffled

El tanque Baffled es un tanque séptico mejorado y utilizado por BORDA¹⁷, para el tratamiento de aguas residuales

¹⁷ BORDA es una organización alemana sin fines de lucro: <http://www.borda-net.org/>

primaria en comunidades de 200 a 2 500 habitantes como parte de su "SDTAR - Sistema Descentralizado de Tratamiento de Aguas Residuales" (para más detalles ver Gutterer et al., 2009). Este tipo de sistema también se conoce como tanque Baffled.

Las características son:

- El tanque Baffled tiene de 4 a 6 compartimentos en vez de los 2 o 3 compartimentos de los tanques sépticos. El tiempo de retención hidráulica es mucho más corto que en un tanque séptico: en climas cálidos de 10-12 horas en comparación con las 24-48 horas utilizadas por los tanques sépticos.
- La proporción de remoción de materia orgánica medida como DBO₅ es aproximadamente de 40% en climas fríos y de 60% en climas cálidos, en consecuencia, la producción de biogás es mayor que en los tanques sépticos y el biogás debe ser quemado o utilizado. Una vez más, desafortunadamente en la práctica esto no es comúnmente realizado.
- El lodo se estabiliza y al igual que el tanque Imhoff puede ser utilizado después de un proceso adicional de secado o de mineralización en la agricultura, siempre y cuando se consideren los aspectos de higiene y se tomen las precauciones de seguridad pertinentes (ver sección 2.8.2).

Los tanques Baffled tienen una mayor proporción de remoción de la materia orgánica (40-60% de la DBO₅) en comparación con los tanques sépticos (típicamente 30%), debido a la aclaración más eficiente y la retención de lodos en el tanque Baffled.

A causa de la mayor eficiencia del tanque Baffled, el HA que trata las aguas residuales pretratadas en él sólo requiere alrededor del 60% de la superficie de un HA que trata las aguas residuales pretratadas en un tanque séptico. Por lo tanto, el mayor costo del pretratamiento en el tanque Baffled se compensa por el menor costo del humedal.

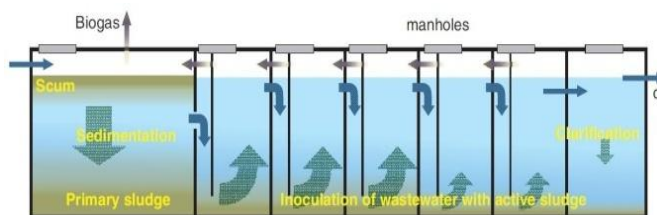


Figura 17. Esquema de un Tanque Baffled con seis compartimentos (fuente: Gutterer et al., 2009).

4.8 Reactor UASB (RAFA)

El reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) es una tecnología de tratamiento de aguas residuales desarrollada por el Sr. Lettinga de los Países Bajos (van Haandel y Lettinga, 1995). Es de uso frecuente en climas cálidos para el tratamiento de aguas residuales municipales, p. ej. hay muchas aplicaciones en Brasil y se utiliza también para los efluentes industriales con alta carga orgánica, tales como efluentes de la industria de alimentos.

El afluente entra por la base del reactor UASB y fluye hacia la superficie. El tiempo de retención hidráulica es muy corto, alrededor de 8 horas. Debido a la alta carga orgánica de la base, las bacterias anaerobias forman gránulos de lodo, que

se compactan bajo la fuerza hidráulica, formando un filtro denso que filtra el agua residual biológicamente y mecánicamente. La salida del agua residual tratada y la captación del biogás se dan en la parte superior del reactor.

El reactor UASB es una tecnología bastante compacta que alcanza una reducción de la materia orgánica (medida como DBO_5) hasta en un 80%. Los reactores UASB sólo son adecuados para grandes plantas (> 5000 PE) ya que tienen una complejidad técnica relativamente alta. La producción de lodos es baja y la captura integrada del biogás permite la utilización o su incineración.

El reactor UASB se utiliza para grandes plantas de tratamiento por su alta eficiencia, por lo tanto el pretratamiento con este sistema en HA permite áreas relativamente pequeñas, sin embargo el HA no es un sistema compacto, todo lo contrario del UASB que si es un sistema compacto, y en el contexto urbano no siempre hay el espacio necesario. Además se debe considerar que el UASB es relativamente sensible cuando las cargas hidráulicas varían (lluvias), lo que puede provocar pérdidas frecuentes del lodo con el efluente final, lo que llevaría a la colmatación del HA FS, por esto es muy importante un diseño adecuado y una operación controlada del reactor UASB.

5 Principios de diseño de HA FS

Esta sección explica los principios generales del diseño de humedales de flujo horizontal (HFH) y humedales de flujo vertical (HFV), que son los dos tipos de humedales artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FS). El lecho filtrante (zona activa) se compone principalmente de arena y raíces de plantas. La grava del lecho no tiene una función de filtración, está para garantizar la distribución del agua, evitar los charcos en la superficie, ayudar en el drenaje y asegurarla permanencia de arena en el lecho filtrante.

5.1 Humedales artificiales de flujo horizontal (HFH)

Los diseños iniciales de los HHAA FS fueron los de flujo horizontal, los cuales siguen siendo el tipo más común de HHAA. Inicialmente los HFH tenían a menudo baja calidad de efluentes, debido principalmente a que las áreas de entrada eran muy pequeñas, pero hoy en día los HFH bien diseñados son altamente aceptados como confiables sistemas de tratamiento con bajos requisitos de mantenimiento. Los HFH son una opción interesante, especialmente para los lugares sin aporte de energía y bajo gradiente hidráulico, mientras que los de HFV requieren bombas para su alimentación.

En los HFH el agua residual fluye lentamente a través del medio poroso por debajo de la superficie del lecho en una trayectoria horizontal hasta llegar a la zona de salida (ver Figura 18). El nivel de agua en los HFH es controlada por una tubería vertical ajustable en la salida. Para un funcionamiento continuo la altura del lecho sumergido debe ser inferior a un tercio de la altura total del material filtrante para evitar condiciones anaeróbicas en el humedal.

La materia orgánica es eliminada del agua residual por las bacterias que crecen en la superficie de las partículas de

arena y en las raíces de las plantas. El suministro de oxígeno juega un papel importante para la eficiencia del proceso de tratamiento. A diferencia de los humedales de flujo vertical (HFV) los humedales de flujo horizontal (HFH) tienen muy poca transferencia adicional de oxígeno externo. Esta es una de las razones por la cual el área requerida para la superficie es mayor que en los HFV.

Otra razón por la que en los HFH se requiere mayor área superficial es porque el área de entrada es relativamente limitada. Ésta consiste en el ancho de la entrada, multiplicado por su profundidad, mientras que el área de entrada del HFV es toda la superficie.

En climas cálidos existe un margen de reducción de la superficie de los humedales, reducción que para los humedales del flujo horizontal (HFH) es poca, mientras que para los humedales del flujo vertical (HFV) es bastante. Por lo tanto los HHAA del flujo horizontal son menos adecuados que los el HHAA del flujo vertical para aplicaciones urbanas donde el espacio es costoso. Y si el objetivo es la reutilización de las aguas residuales, por ejemplo para el riego, los HFH son los menos recomendados, en estos climas cálidos, debido a su mayor tasa de evaporación.

Las siguientes recomendaciones son básicas para el diseño de HFH para el tratamiento de aguas residuales domésticas:

- La superficie del filtro debe mantenerse plana para evitar erosión, sin embargo el fondo debe tener una pendiente de 0,5 a 1% de la entrada a la salida para lograr un buen drenaje (Morel y Diener, 2006).
- Normalmente la profundidad del lecho del filtro es alrededor de 60 cm con un borde libre adicional de 15 cm para la acumulación del agua.
- El área de superficie específica requerida es de unos **3-10 m^2/PE** dependiendo de la temperatura y dependiendo de la temperatura y de la carga específica¹⁸. En climas cálidos el área requerida es menor debido a la mayor actividad biológica. En climas fríos el valor de cálculo mínimo no debe ser inferior a los $5\text{m}^2/\text{PE}$ (por ejemplo, en Alemania).
- La carga orgánica por unidad de superficie no debe exceder en los climas fríos a los $4\text{-}10 \text{ gDBO}_5/\text{m}^2/\text{d}$ (Wood, 1995; Morel y Diener, 2006) o a los $16 \text{ gDQO}/(\text{m}\cdot\text{d})$ (DWA, 2006). No se tiene datos disponibles para los climas cálidos con sustrato de arena gruesa.
- La carga hidráulica de aguas grises oscila entre 60 y 80 mm/d (Wood, 1995; Ridderstolpe de 2004, Morel y Diener, 2006) mientras que aguas residuales tiene una carga de $40 \text{ mm}/\text{d}$ (DWA, 2006). Sin embargo, el factor limitante es la carga orgánica, lo que significa que probablemente las aguas grises con *baja carga orgánica* (de las duchas o lavandería), se puedan aplicar incluso con mayores cargas hidráulicas en los HFH.

¹⁸ En general, el parámetro de diseño "área requerida por persona" para el tratamiento de aguas grises es menor al del promedio de aguas residuales. Pero ya que las características de aguas grises varían ampliamente (por ejemplo, aguas grises de cocina frente a las de ducha), es mejor utilizar la carga de DBO_5 como un parámetro de diseño. Para las aguas grises con baja concentración de DBO_5 , se puede utilizar la carga hidráulica para el diseño.

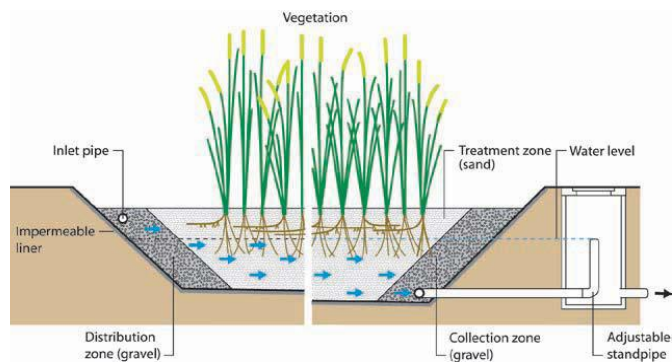


Figura 18. Esquema de la sección transversal de un HFH (fuente: Morel y Diener, 2006).

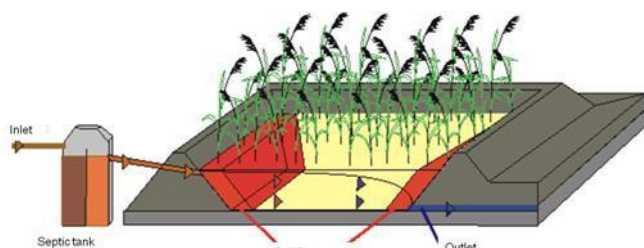


Figura 19. Esquema de la sección transversal que muestra HFH con un tanque séptico como pretratamiento a la izquierda (fuente: Fehr, 2003).



Figura 20. HFH con dique de piedras en la zona de entrada que ayuda con la distribución e infiltración del agua a tratar, cerca de Leiria, Portugal (foto J. Vymazal, 2003).

Los HFH son más fáciles de diseñar y construir que los HFV, sin embargo, debido a errores del diseño pueden fallar. El punto más importante para un diseño adecuado es la zona de entrada que actúa como filtro y elimina una parte importante de los sólidos en suspensión.

En los HFH la obstrucción se produce principalmente en la zona de entrada por la acumulación de los sólidos en suspensión o por la colmatación del biofilm (lodos). Esta obstrucción es causada por un deficiente pretratamiento, una carga mayor a la del diseño, un área de entrada inferior a la requerida o un material de filtro muy fino.

Los HFH incorrectamente diseñados también pueden exhibir "escorrentía superficial". Esto puede ocurrir si el área de entrada es muy pequeña o está obstruida, por lo que las aguas residuales se acumulan en la zona de entrada o

forman inundaciones en la superficie del humedal. Al no infiltrarse los flujos de agua salen del lecho sin tratamiento. Para evitar las obstrucciones y escorrentía superficial se recomiendan las siguientes acciones:

- Optimizar la eficiencia del pretratamiento, este es el mejor método para evitar los problemas de obstrucción e infiltración.
- La zona de entrada se puede llenar con pequeñas piedras o grava gruesa que garanticen que las aguas residuales se distribuyan de manera uniforme sobre todo en el ancho y profundidad del lecho. En el caso se utilicen los tubos de distribución, el nivel de dichos tubos, así como la distancia y el tamaño de los huecos de salida deben garantizar que el afluente se distribuya uniformemente en toda la área de entrada
- Otra posibilidad para garantizar la distribución uniforme del afluente es construir un pequeño dique a los 2 m iniciales del lecho, de manera que la primera parte de la superficie del HFH sirve como zona de entrada (ver figura 20).
- Es absolutamente necesario hacer un dimensionamiento hidráulico por la ley de Darcy para garantizar un suficiente gradiente hidráulico del lecho filtrante¹⁹.

Los siguientes puntos ofrecen una guía básica para el diseño de los HFH con arena gruesa como material de filtro:

- El uso eficiente del área de filtro está dada por longitud del filtro (distancia de la entrada a la salida) de aproximadamente 5-8 m (DWA, 2006). Mayores longitudes de filtro daría lugar a problemas hidráulicos.
- La longitud de entrada (ancho del lecho) se recomienda que no sea mayor a 15 m, ancho común en Alemania, aunque otros planteamientos de diseño utilizan hasta 25 m de ancho. Ciertamente, una entrada con más de 30 metros no es recomendable, ya que conduce a una distribución desigual del flujo. Se recomienda dividir en estos casos el área de entrada en varios compartimentos con entradas independientes.
- El tamaño de las partículas del medio filtrante deben ser lo suficientemente grande para permitir un flujo continuo de las aguas residuales sin obstrucción, pero no deben ser tan grandes como para no reducir la eficacia del tratamiento.

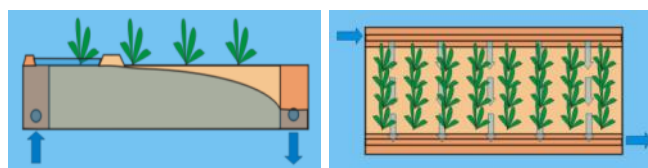


Figura 21 *Izquierda:* Vista lateral del nivel del flujo en el HFH, se muestra el dique de entrada que controla y previene la obstrucción y escorrentía superficial de las aguas residuales. La flecha vertical izquierda indica la entrada y la flecha vertical derecha la salida del agua. *Derecha:* Vista superior de la geometría correcta de un gran HFH donde la longitud del filtro (ver las flechas verticales) es de 5-8 m, y el ancho del lecho (ver las flechas horizontales) es como máximo de 30 m (fuente: Platzer, 2000).

¹⁹ En dinámica de fluidos e hidrología, la ley de Darcy es una ecuación fenomenológicamente derivada que describe el flujo de un fluido a través de un medio poroso (fuente: www.wikipedia.org). Para más detalles vea los manuales de diseño, tales como Metcalf y Eddy (2003).

5.2 Humedales artificiales de flujo vertical (HFV)

5.2.1 Recomendaciones básicas de diseño

Los humedales de flujo vertical (HFV) son más adecuados que los de flujo horizontal (HFH) cuando hay una restricción de espacio, ya que tienen una mayor eficiencia de tratamiento.

En los HFV las aguas residuales pretratadas son bombeadas de forma intermitente a la superficie y luego percoladas verticalmente hacia abajo a través de la capa filtrante hacia un sistema de drenaje en la parte inferior. El proceso de tratamiento se caracteriza por intervalos intermitentes de carga de corta duración (de 4 a 12 dosis por día) y largos períodos de descanso durante los cuales el agua residual se filtra a través del sustrato saturado y la superficie se seca.

La carga intermitente de lotes aumenta la transferencia de oxígeno y conduce a una alta actividad de degradación aerobia. Por lo tanto, los humedales de FV siempre necesitan bombas o de lo contrario sifones que carguen por pulsos, mientras que los HFH pueden funcionar sin bombas.

Las siguientes recomendaciones son básicas para el diseño de HFV para el tratamiento de aguas residuales domésticas:

- La superficie superior del filtro debe mantener un mismo nivel y las tuberías de distribución a menudo son cubiertas con grava para evitar la acumulación de agua durante los períodos de bombeo.
- Las tuberías de distribución deben ser diseñadas de tal manera que den una distribución uniforme de las aguas residuales, previamente tratadas, en toda la superficie del humedal artificial (ver Figura 6). Esto se consigue seleccionando el tamaño exacto de las tuberías de distribución, la longitud de las tuberías, el diámetro de los agujeros y el espaciamiento entre los agujeros en las tuberías de distribución.
- La distancia entre los tubos de drenaje se basa en un diseño detallado, pero puede ser como máximo de hasta 5 m. Para permitir un buen drenaje los tubos deberán estar cubiertos con grava.
- Para los grandes HFV es importante que el fondo tenga una pendiente de 0,5-1% en dirección a la salida.
- La profundidad del lecho de arena (zona activa) debe de ser de al menos unos 50 cm. En la base para cubrir las tuberías de drenaje se necesita adicionalmente 20 cm de grava y en la parte superior del lecho 10 cm de grava. La grava en la parte superior evita la acumulación de agua al aire libre, y se podría omitir si no hubiese acceso del público al humedal artificial, se debe evitar que la superficie sea pisada. Se debe dejar al menos unos 15 cm de borde libre para la acumulación de agua.
- El área de superficie específica requerida es generalmente de **3-4 m²/PE** en las regiones frías y de **1-2 m²/PE** en regiones cálidas¹⁸. Sin embargo, esto también puede variar dependiendo de la opción de reutilización, la carga específica y la legislación local. Los autores tienen buenas experiencias con el diseño de HFV en climas cálidos, con alrededor de 1,2 m²/PE (Platzer, et al., 2007).
- La carga orgánica por unidad de superficie debe limitarse a **20 g DQO/m²/d** en los climas fríos (DWA, 2006; ÖNORM, 2009). Esto se aplica para las aguas grises y aguas residuales. Sin embargo los autores han tenido buenas experiencias con HFV diseñados en

climas cálidos, con alrededor de **60-70 g DQO/m²/d**, que corresponde a alrededor de unos **30-35 g DBO₅/m²/d**.

25

- La carga hidráulica para HFV en climas fríos no debe exceder a los **100-120 mm/d** (DWA, 2006). Las experiencias de los autores demostraron que en climas cálidos las tasas hidráulicas de aguas residuales pre-tratadas pueden ser aplicadas sin influencia negativa hasta unos **200 mm/d**. Durante los eventos de lluvia, se puede aplicar una carga hidráulica de corto plazo de **hasta 500 mm/d**.
- El factor clave en climas cálidos es dimensionar de acuerdo a la disponibilidad de oxígeno, ver sección 5.2.2.

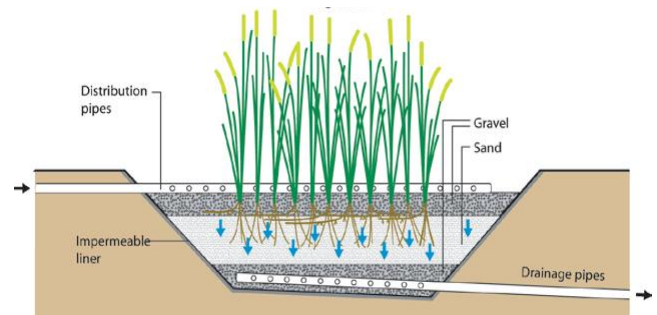


Figura 22. Esquema en corte de un HFV (Morel y Diener, 2006)²⁰ con filtro de arena gruesa, grava en la superficie y en el fondo para proteger el dren.

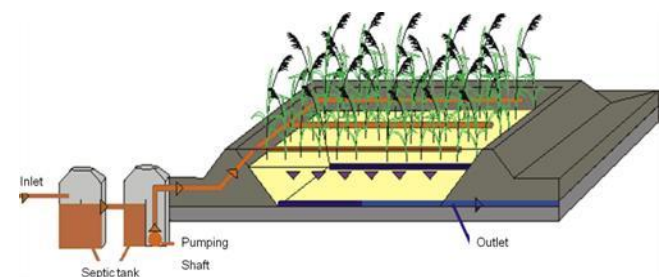


Figura 23. Esquema de la sección transversal que muestra un HFV y a la izquierda el tanque séptico como pretratamiento (fuente: Fehr, 2003).

Desde la publicación de los primeros resultados en la conferencia IAWQ en Cambridge, Reino Unido (Cooper y Findlater, 1990) el desarrollo de los HFV ha sido muy rápido. Debido a su alta capacidad de tratamiento para la remoción de materia orgánica y nitrificación, los HFV se han convertido en los últimos 20 años los humedales artificiales de uso principal en las regiones donde tienen altas exigencias para la eficiencia de tratamiento de aguas residuales (Platzer, 1999; Philipi et al., 2006; Platzer et al., 2007).

Los sólidos en suspensión y la remoción de materia orgánica son alrededor del 90-99%. La nitrificación es comúnmente reportada como casi completa con la oxidación del amoníaco al 90%. Más información sobre la eliminación de nitrógeno se proporciona en la sección 3.1.3.

²⁰ Nota sobre este esquema: Las tuberías de distribución se encuentran comúnmente encima de la capa de grava..

5.2.2 La obstrucción y la aireación del suelo en HFV

Un aspecto muy importante de los HFV es el riesgo de obstrucción de la superficie del lecho filtrante que da lugar a la falla general del sistema (Cooper and Green, 1994; Platzer and Mauch, 1997; Winter and Goetz, 2003). Las obstrucciones o colmataciones temporales son parte del proceso y se producen regularmente en los HFV. La obstrucción temporal se revierte con el reposo frecuente de la superficie afectada. En el diseño y la operación de los HFV, especialmente para una población mayor de 50 PE, siempre se debe considerar esta condición.

La obstrucción de la superficie de los HFV, que ocurren por la acumulación de los sólidos en suspensión o por el rápido crecimiento del biofilm (lodos), es causada por un pobre pretratamiento, una carga alta o una arena muy fina. El término utilizado en la literatura es obstrucción o colmatación del material filtrante.

La obstrucción es una reacción normal causada por la actividad biológica de los microorganismos. Por lo tanto el sistema tiene que ser diseñado suficientemente grande para que los periodos de descanso puedan ocurrir, periodos que se tienen que dar por partes y en alterno. Otra posibilidad para evitar la obstrucción es mantener la carga lo suficientemente baja como para que los procesos de degradación natural no produzcan exceso de biomasa (lodo).

Las experiencias con obstrucciones del material filtrante en humedales artificiales son muy diferentes debido a que el problema depende de muchos factores. El principal factor para un buen funcionamiento de los HFV es una óptima aireación del lecho filtrante y por lo tanto los siguientes aspectos de diseño son muy importantes:

- Las aguas residuales deben ser bombeadas al HFV intermitentemente de **4 a 12 veces al día**.
- Para el tratamiento de las aguas residuales de más de 50 unidades de habitantes los HFV deben tener en el lecho de 2 a 4 unidades de infiltración para poder descansar alternadamente y de manera regular (6 semanas en funcionamiento y 2 semanas de descanso) cada unidad de infiltración.
- Es necesario una distribución uniforme del agua residual en toda la superficie.
- La carga de sólidos filtrables debe ser menor a $5 \text{ g/m}^2/\text{d}$, y para esto se requiere de un eficiente pretratamiento.
- Las plantas adecuadas con un sistema bien desarrollado de raíces y rizoma desempeñan un papel importante en el mantenimiento y restauración de la conductividad del lecho filtrante.
- Las cargas hidráulicas y orgánicas del HFV necesitan ser revisadas periódicamente y no deben exceder los valores de cálculo que figuran en la sección anterior.

En los humedales de FV el suministro de oxígeno es el factor clave para una degradación eficiente de la materia orgánica, una buena nitrificación y para evitar las obstrucciones. Es por esto que el parámetro de uso común para el diseño de "superficie por persona equivalente" no es suficiente para garantizar buenos resultados de tratamiento.

El dimensionamiento basado en la demanda de oxígeno para HFV fue desarrollado por primera vez por Platzer (1999). El diseño depende de la demanda de oxígeno para la oxidación de la materia orgánica y para la nitrificación, así

como de la entrada de oxígeno (de la frecuencia y el volumen de carga, de las raíces y la superficie). 26

Para la entrada de oxígeno es muy importante una alimentación por cargas intermitentes que permite la transferencia adecuada de oxígeno en el HFV. La cual se garantiza cuando la aplicación e infiltración se producen en cortos tiempos, con bastante diferencia para la siguiente aplicación y que da tiempo al reposo.

Todavía hay una falta de conocimiento sobre el impacto total de todos los factores que pueden influir en la eficiencia del tratamiento de los humedales, como: las condiciones climáticas, las características del agua residual, la influencia de las plantas y los procesos microbiológicos de degradación. Las interacciones entre unos y otros aún no están totalmente entendidas. Para tener un mejor entendimiento del proceso de tratamiento, los humedales artificiales deben ser bien planificados, gestionados y monitoreados de manera que puedan dar importantes informaciones.

5.3 El sistema Francés para tratamiento primario y secundario de aguas residuales

En Francia, alrededor de 1990 se creó un tratamiento especial de flujo vertical con HHAA FS para aguas residuales crudas llamado "sistema Francés". Un aspecto muy interesante de este sistema es que el pretratamiento es parte de este sistema pero no genera lodos, no libera biogás ni provoca costos adicionales para su mantenimiento, sin embargo es altamente eficiente y por lo tanto es ideal para comunidades que tienen suficiente espacio para implementar el sistema.

La siguiente descripción del sistema de HFV utilizados en dos etapas se basa principalmente en una publicación de Molle et al. (2005).

La primera etapa del sistema Francés es un HFV, pero con grava de lecho filtrante, la cual ha sido diseñado para el pretratamiento del agua residual cruda. Las aguas residuales pueden pasar o no previamente por cribas o rejas, para separar los sólidos más grandes, y luego ser bombeadas a la superficie del primer humedal a través de tuberías de distribución de aproximadamente de 100mm de diámetro. Las cuales están abiertas para descargar las aguas residuales crudas en diversos puntos y distribuir las directamente en la superficie del lecho. Acá los sólidos se acumulan y se oxidan en contacto con el oxígeno del aire, mientras el líquido filtra hacia el fondo del humedal para seguir su tratamiento. El líquido pretratado pasa en la segunda etapa, a un HFV "convencional" con arena gruesa como lecho filtrante.

Molle et al. (2005) recomienda dividir la superficie de la primera etapa del tratamiento de en tres compartimento sin dependientes o construir tres humedales separados. Para la segunda etapa recomienda la construcción de dos humedales separados (o alternativamente dividir la superficie en dos compartimentos independientes) como se puede ver en la Figura 24.



Figura 24. Sistema Francés para 800 PE, de izquierda a derecha: tres HFV (filtros) para el pretratamiento y dos HFV para el tratamiento secundario en Albondón, España. La planta no necesita suministro de electricidad, ya que está construida en pendiente (foto T. Burkard, AKUT, 2005).

Los 3 compartimentos o humedales de la primera etapa se operan en alternó para controlar el crecimiento de la biomasa, mantener las condiciones aerobias en el lecho y permitir que el lodo se seque. Cada compartimento o humedal recibe todas las aguas residuales durante 3-4 días, y luego descansa durante 6-8 días, mientras que los otros compartimentos o humedales son utilizados.

El agua residual cruda es pretratada (filtrada) en la primera etapa: pasando primero a través de una capa de 30 cm de grava fina (tamaño de partícula de 2-8 mm), después a través de una capa de 10-20 cm de grava de transición (tamaño de partícula de 5-20 mm) y luego por la capa de drenaje (grava con un tamaño de partícula de 20 a 40 mm o incluso de 30 a 60 mm) en la parte inferior del lecho del filtro (ver Figura 25). Los sólidos retenidos en la superficie se mineralizan²¹ (ver Figura 26).

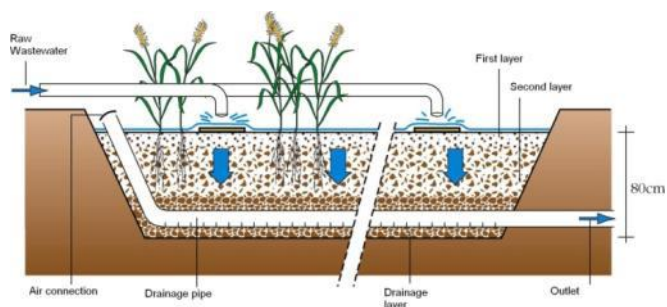


Figura 25. Esquema de la primera etapa: pretratamiento de aguas residuales crudas en el sistema Francés (fuente Molle et al., 2005). El efluente crudo sale por los tubos directamente a la superficie del humedal

Los dos humedales de flujo vertical (HFV) de la segunda etapa se utilizan en paralelo, con la opción de descansar un filtro o alternar la operación. Estos humedales tienen una capa de arena de 30 cm (d_{10} de 0,25 mm a 0,4 mm)²². En

²¹ En biología, la mineralización se refiere al proceso mediante el cual una sustancia orgánica se convierte en una sustancia inorgánica.

²² El D_{10} es el tamaño que le corresponde al diámetro de la partícula dentro del 10% de los granos más pequeños de la granulometría del material (para más detalles ver el Apéndice).

Francia generalmente los lechos del filtro son plantados con carrizo (*Phragmites australis*).



Figura 26. Tuberías de distribución de las aguas residuales sobre el lecho de pretratamiento del sistema Francés, Albondón, España (foto T. Burkard, AKUT, 2007).

En el dimensionamiento del Sistema Francés para el tratamiento de aguas residuales municipales Molle et al. (2005) recomienda:

- Para la primera etapa del pretratamiento: 1,2 m²/PE (equivalente a una carga promedio de 100 g DQO/m²/d, 50g de SST/m²/d, 10 g NTK/m²/d y 120 L/m/d dividido en más de tres unidades idénticamente alimentadas alternadamente.
- Para el tratamiento secundario (segunda etapa): 0,8 m²/PE dividido en dos líneas paralelas o lechos alimentados en alternó. Esto resulta en una carga media baja del efluente de 25g DQO/m²/d.

Molle et al. (2005) reportó que el lecho de grava que es altamente cargado remueve el 80% de DQO, el 86% de SST y el 50% de TKN, siendo el sistema más eficiente que cualquier otro tratamiento convencional primario. En muchos países este resultado sería suficiente para descargar el agua al río. Los sólidos retenidos en la superficie del lecho del filtro de grava forman una capa de lodo, que limita la infiltración y mejora la distribución del agua en la superficie.

El lodo acumulado en el lecho del filtro crece alrededor de 1,5 cm por año. La operación se alterna en tres unidades de pre-tratamiento que posibilita el secado y la mineralización del lodo. Después de 10-15 años se tendrá acumulado una capa de hasta unos 20cm que deberá ser retirada. Es posible el uso de esta tierra negra con fines agrícolas, como abono, pero como siempre, la reutilización también depende del contenido de metales pesados de las aguas residuales.

La segunda etapa es necesaria para completar la nitrificación y eliminarlos patógenos. Además para completar la reducción de la DQO y los SST, el tratamiento total (primera y segunda etapa) del sistema Francés normalmente elimina el 90% de DQO, el 96% de SST y el 85% de TKN.

Este sistema es una opción interesante para pequeñas comunidades, ya que es sencillo y de bajo costo. Evita las desventajas de los pretratamientos convencionales, es decir la producción de lodos primarios y las emisiones de biogás (ver sección 4.2). El sistema Francés se ha utilizado desde hace más de 20 años, y existen cerca de 500 humedales de este tipo en Francia. También ahora algunas de estas plantas son usadas en Alemania, Portugal y España.

Si se quiere comparar la **necesidad de espacio** entre el sistema Francés y los humedales convencionales de FV y FH se debe considerar que el sistema Francés ya **incluye el**

pretratamiento. Para el caso de los humedales de FV y FH con pretratamiento (PrTr) convencional se debe añadir el área requerida para el pretratamiento. Además aún no hay suficientes experiencias con la aplicación del sistema Francés en clima cálido. El pretratamiento (lecho de grava) del sistema Francés es muy eficiente y permite reducir el área de tratamiento principal. Hasta que se tenga más experiencias en climas cálidos, se recomienda considerar la siguiente relación (siempre y cuando se comparen con pretratamientos eficientes, como por ejemplo el tanque Baffled):

- **Para climas fríos:**
PrTr + HFH > PrTr + HFV > Sistema Francés (es decir, el sistema Francés requiere menos espacio)
- **Para climas cálidos:**
PrTr + HFH > Sistema Francés > PrTr + HFV (significa que humedales de FV requieren menos espacio)

Las desventajas del sistema Francés incluyen:

- Debido a la necesidad de carga intermitente para cada una de las dos etapas, son necesarias dos estaciones de bombeo. Para evitar el bombeo se puede utilizar un sifón autocebante para la carga intermitente de los lotes en lechos filtrante. Los sifones necesitan diferencia de altura entre el nivel del afluente y la superficie.
- El sistema Francés no es adecuado para pequeñas instalaciones de nivel doméstico debido a los posibles problemas de higiene al tener acceso libre de las aguas residuales crudas cerca de la casa.
- Muchos expertos dudan en construir el sistema Francés, porque le temen a la falta de aceptación debido a la aplicación de aguas residuales crudas sobre el lecho del filtro. Con el fin de evitar problemas con la aceptación social el sistema no deberían ser construido en áreas densamente pobladas.

Según los autores, el sistema Francés en el futuro tiene un potencial significativo en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas a nivel comunitario, las cuales deben estar cercadas para evitar el acceso no controlado.

5.4 Sistema híbrido

Los diferentes tipos de HHAA FS pueden ser combinados con el fin de lograr una mayor eficacia en el tratamiento, en especial para la eliminación de nitrógeno y patógenos. En este caso, las ventajas de los sistemas de FH y FV se combinan para complementarse entre sí. Aunque los sistemas híbridos son más caros de construir y más complicados de operar que los sistemas no híbridos se ha producido un creciente interés en ellos.

5.5 Ejemplo de proyectos

La Tabla 6 contiene ejemplos de humedales artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas. En climas cálidos, el área específica puede ser relativamente baja, ya que la actividad biológica es elevada. Sin embargo, es riesgoso construir humedales con diseños muy ajustados de área específica, ya que existe un mayor riesgo de que el proceso fracase.

Tabla 6. Ejemplo de requisitos de área para humedales de FV (ver estudios de caso SuSanA para más detalles²³).

Área específica (m ² /PE)	HA parámetros del tamaño (valores de medición)	Ubicación y tipo de aguas residuales
0.4	7 000 PE; 2 992 m ² ; 300 m ³ /d; (43 L/ (hab·d))	Harán Al-Awamied, Siria (aguas residuales domésticas después de tanques de sedimentación)
0.9	3 000 PE; 2 680 m ² ; 150 m ³ /d; (50 L/ (hab·d))	Ciudad de Bayawan, Filipinas (aguas residuales domésticas después de tanque séptico) ²⁴
1.7	140 PE; 240 m ² ; 10-13 m ³ /d; (82 L/ (hab·d))	Allermoehe Hamburgo, Alemania (aguas grises con tanque de sedimentación)
1.7	460 PE; 771 m ² ; caudal no conocido	Pichling Linz Ciudad Solar, Austria (aguas grises y filtro de compost para aguas marrones ²⁵)
1.9	270 PE; 500 m ² ; 25-30 m ³ /d; (102 L/ (hab·d))	Dubái, Emiratos Árabes Unidos (aguas grises después de sedimentador)



Figura 27. HA FS en la ciudad Bayawan, Filipinas. La ruta de acceso del centro separa el HFV del HFH (foto J. Boorsma 2009, proyecto apoyado por GIZ)²⁶.

La Tabla 7 muestra cómo las cargas separadas de aguas grises y aguas negras se calcularon para un colegio en Lima (Hoffmann, 2008; Hoffmann et al., 2009). Ambas corrientes de aguas residuales se tratan por separado en dos humedales artificiales y se utilizan posteriormente para el riego²⁷.

El colegio utiliza alrededor de 200 m³ de agua potable al mes. Viven constantemente 18 personas y en el ámbito escolar vienen de fuera unas 40 personas. La ocupación

²³ http://www.susana.org/lang-en/case-studies?showby=default&vbls=1&vbl_1=4&vbl_0=0

²⁴ Tipo de humedal: HFV seguido de HFH

²⁵ Agua marrón es una mezcla de agua con heces.

²⁶ Para más información en Inglés de este proyecto ver SuSanA: <http://www.susana.org/lang-es/case-studies?view=ccbktpeitem&type=2&id=51>

²⁷ Para obtener más información sobre este proyecto, por favor consulte SuSanA Estudio de caso: <http://www.susana.org/lang-en/case-studies?view=ccbktpeitem&type=2&id=741>

diaria fue calculada para 70 PE. Como todas las instalaciones sanitarias ya existían, sólo fue posible la separación de aguas grises en la panadería de la escuela comercial, lavandería y dos cocinas (la cocina de la escuela y una privada). En la cocina de la escuela se preparan alrededor de 60 raciones al día.

El efluente de todos los baños (con sanitarios, duchas y lavamanos) y dos comedores privados se juntaron y se les denomina "aguas negras". La carga específica de aguas negras por persona tuvo que ser estimado con anticipación, este es un problema común en los proyectos de saneamiento sostenible. Siempre se recomienda utilizar factores de seguridad adecuados en los cálculos a fin de evitar situaciones de sobrecarga.

Tabla 7. Ejemplo del cálculo de las cargas de aguas grises y aguas negras para el área superficial de dos HHAA para un colegio en Lima, Perú (base de diseño de 70 PE). El texto en entre paréntesis proporciona los porcentajes de reducción.

Units	Total ^a	Aguas Grises		Aguas Negras	
		Separación	Trampa de grasa	Separación	Filtro de compostero
L/d	7 000 (100%)	2 100 (30%)	N/A	4 900 (70%)	N/A
gDBO ₅ /d	3 500 (100%)	700 (20%)	630 (-10%)	2 800 (80%)	2 100 (-25%)
Área de HFV en m ² para clima cálido, con DBO ₅ de 30g/m ² /d		N/A	21	N/A	70

Notas: N/A = sin efecto

^a El caudal de las aguas residuales se calculó mediante el uso de agua potable, conocida por mes, la DBO₅ se basó en la norma peruana (ver Tabla 8)

^b Las aguas negras son pretratadas en un filtro compostero (ver sección 4.5), reducción de la DBO₅ se estimó en 25%

Los resultados después de tres años de funcionamiento:

- La remoción de DBO₅ en el HFV para aguas grises (21 m²) y negras (70 m²) fue de alrededor del 95%.
- La eliminación de sólidos en suspensión fue aproximadamente del 90% en el HFV de aguas grises, y del 86% en el HFV de aguas negras.
- El número de bacterias coliformes termotolerantes en el efluente fue inferior a 1 000 por cada 100 ml.
- Toda el agua tratada se utiliza para el riego de cultivos, árboles y zonas verdes (Hoffmann, 2008).

6 Operación y mantenimiento

6.1 Tareas generales de operación y mantenimiento para HHAA de flujo horizontal y vertical

Aunque los humedales artificiales son "tecnologías sencillas", el sistema requiere de un mantenimiento adecuado por parte de una persona capacitada con los conocimientos básicos.

Como se indicó en la sección 4 las unidades de pre-tratamiento requieren de mantenimientos que dependen del tipo de tecnología. La eficiencia de las unidades de pre-tratamiento tiene que ser examinadas de forma regular. Cuanto mayor sea el sistema, mayor será la frecuencia requerida. El caso de los sólidos sedimentables en el efluente del sistema de pre-tratamiento debe ser analizado mediante el uso de un "cono Imhoff" con el fin de conocer la cantidad de sólidos que son trasladados al humedal. Los lodos de los sistemas de pre-tratamiento tienen que ser eliminado con regularidad.

Las tareas operativas necesarias para mantener el lecho filtrante de los humedales artificiales incluyen el control periódico de:

- Bombas
- Las estructuras de entrada para revisar obstrucciones y nivel de agua
- Las estructuras de salida para revisar el nivel de agua
- La relación de carga hidráulica y cargas contaminantes, es decir, concentraciones de los afluentes y efluentes de DBO₅ y SS, así como el caudal del afluente.
- Enfermedades en la vegetación de los humedales, insectos, etc. (quitar las malas hierbas y plantas depredadores hasta que la vegetación de los humedales está plenamente establecida).



Figura 28. *Izquierda:* Mal funcionamiento de la trampa de grasa con acumulación de lodos en exceso. *Derecha:* los lodos de la trampa de grasa obstruyen la zona de infiltración del HA, el color negro se da porque no hay transporte de oxígeno lo que lleva a la obstrucción (fotos H. Hoffmann, 2009, Lima, Perú).

Si se ignora el mantenimiento tarde o temprano ocurrirán las siguientes consecuencias:

- Distribución irregular del flujo
- Sobrecargas locales y con olor
- Deterioro de la eficiencia de tratamiento.

6.2 Operación y mantenimiento de HHAA de flujo horizontal (FH)

Es muy importante revisar el lecho filtrante para evitar la obstrucción. La obstrucción se produce por ejemplo en HA FH que se construyeron hace tiempo, es decir, cuando la distancia horizontal entre la entrada y la salida era muy larga. El HFH tiene una zona de entrada relativamente corta con una alta carga hidráulica.

Una alternativa posible para la renovación del HA de flujo horizontal (FH) es dividirlo por el medio después de la mitad longitudinal horizontal, cavando una zanja y colocando tubos de drenaje. La nueva trinchera se convertirá así en una entrada o en una zanja "de alimentación". Con esta modificación, la zona de entrada se duplica y la distancia se redujo a la mitad del flujo.

Otra posibilidad es introducir una pequeña presa a 2 m de la entrada del lecho (ver Figura 21). Con esta medida, la primera parte del HFH sirve como una zona de entrada.

Otras tareas para la consideración del operador y por lo tanto para el diseñador son:

- Cuando el lodo se acumula en la zona de entrada del HFH, el lecho filtrante tiene que ser sacado de operación para que pueda secar. En el peor de los casos, todo el material del filtro afectado en el área de entrada tiene que ser cambiado. Hasta que el material del filtro no sea cambiado, el HA no puede operar ni tratar las aguas residuales.
- Especialmente en el caso de HFH es recomendable tener la posibilidad de vez en cuando de represar el agua en el lecho filtrante por completo para poder controlar el crecimiento de las plantas de los humedales.
- Con el fin de garantizar la suficiente aireación del lecho filtrante es recomendable tener la opción de bajar el nivel del agua hasta la parte inferior del HFH.

6.3 Operación y mantenimiento de HHA de flujo vertical (FV)

Los humedales artificiales de Flujo vertical (HFV) necesitan de más operación y mantenimiento que los de flujo horizontal. Las siguientes actividades de operación y mantenimiento se deben realizar para el HFV:

- Para los humedales de FV es importante la distribución uniforme del efluente pre-tratado en toda la superficie, esto debe controlarse especialmente. Válvulas antes de la distribución de las tuberías y las tapas removibles al final permiten la limpieza de las tuberías durante la fase de bombeo (ver Figura 29). En caso de que el lecho filtrante, o una parte de él, se vea afectado por la obstrucción y tenga que descansar, las válvulas se pueden cerrar.
- Los intervalos de alimentación de las aguas residuales tienen que ser mantenidos por un sistema automático de bombas o sifones. Sin embargo, si la producción de aguas grises de una casa tiene una periodicidad adecuada y/o regularlos HFV para el tratamiento de aguas grises pueden ser diseñados sin bomba o sifón,
- La superficie debe de tener la posibilidad de secarse entre cada carga de aguas residuales.
- Se deben tomar acciones inmediatas en caso de obstrucción (para más detalles ver sección 5.2.2). El HFV se puede recuperar bien después de un período de descanso de dos semanas en el que el lecho filtrante se seque. Sin embargo, en zonas de clima frío con temperatura baja y períodos de congelación (temperatura 0-8 ° C) un HFV no se puede recuperar tan rápido. Es por eso que los HFV en las zonas de climas frío tienen que ser diseñados mucho más grandes (ver Tabla 3).
- Es mejor sobrecargar una parte del lecho filtrante con el fin de dejar descansar la otra parte que esperar a que todo el sistema se recupere al mismo tiempo. Una vez

obstruido, el sistema no se puede recuperar, sin periodos de descanso. Se ha demostrado que el HFV puede recuperar casi por completo su eficacia después de largos períodos de reposo (Platzer y Mauch, 1997). Este período de descanso es necesario para secar completamente la capa de tapado y puede ser tan corto como tres semanas en clima seco y soleado a cerca de seis meses en clima frío y húmedo.



Figura 29. *Izquierda:* Limpieza de las tuberías de distribución de agua residual por medio de la apertura y cierre de válvulas durante la fase de bombeo (plantas de papiro paraguá después de un proceso de replantado). *Derecha:* Tapa abierta en una tubería de distribución obstruida (fotos H. Hoffmann, 2009, Lima, Perú).

6.4 ¿Las plantas de los humedales deben ser removidas o no?

Si las plantas de los humedales artificiales deben ser cosechadas o no es aún discutible. No se puede dar una respuesta general, pero las plantas deben ser podadas si afectan el funcionamiento o las actividades de mantenimiento. Las experiencias en zonas de clima cálido han demostrado que las plantas en los HFV deben ser removidas cada dos años para permitir una inspección visual del sistema de distribución.

Además, hay una diferencia entre un clima "cálido y seco" y un clima "caliente y húmedo". Por ejemplo, en Dubai con un clima cálido y seco, la tasa de descomposición de la caña muerta acumulada en la superficie es muy lenta, mientras que en Brasil, con un clima cálido y húmedo es muy rápido. Por lo tanto, un humedal artificial en Dubai tendrá una cosecha más frecuentemente que en Brasil (ver Figura 30 y Sievert y Schlick (2009)).

Los beneficios de cosechar las plantas de los humedales artificiales incluyen:

- Los nutrientes que han sido tomados por las plantas son removidos del sistema.
- En el caso de los humedales de FV la menor biomasa de las plantas puede hacer más fácil las tareas de mantenimiento.
- El material vegetal es posible utilizarlo como cultivo de forraje o paja.

Los beneficios de no cosechar las plantas de los humedales artificiales incluyen:

- La creación de una capa aislante del material vegetal muerto. Esto sólo es importante para las zonas de clima moderado.
- Suministro de un fuente de carbono para la desnitrificación, si la eliminación de nitrógeno es importante.
- No hay alteración del funcionamiento ecológico del humedal.
- Menos trabajo para el personal de mantenimiento.



Figura 30. Humedal artificial en Duba para tratamiento de aguas residuales, el Carrizo (*Phragmites*) puede llegar a tener altura de 6m (foto W. Sievert, 2007).



Figure 31. *Cyperus papyrus* después de 12 meses en un HA de flujo vertical (Brasil): Crecimiento horizontal de nuevas plantas, sin raíces verticales. Estas plantas pueden caer y no contribuyen al proceso de tratamiento (foto H. Hoffmann, 2008).

6.5 Soluciones rápidas para los humedales

Una indicación de cómo está funcionando el lecho filtrante se puede obtener mediante la evaluación del efluente del humedal artificial por el aspecto visual y olor:

- La turbidez y / o el color gris son indicadores de que el suministro de oxígeno es insuficiente. La reacción debe ser:
 - En el caso de humedales de FV, se debe garantizar una distribución uniforme. Puede ser que los intervalos entre los pulsos de bombeo de los efluentes sean demasiado cortos. Por lo que, la superficie no se seca y esto puede conducir a la obstrucción.
 - En caso de los HFH el drenaje del efluente, debería reducirse con el fin de permitir un mayor suministro de oxígeno en el lecho filtrante.
- Un desagradable olor de huevos "podridos" indica condiciones anaeróbicas en el lecho filtrante. Esta es una situación muy crítica. El lecho filtrante debe estar en reposo y la carga del lecho del filtro debe bajar con el fin de aumentar el suministro de oxígeno (ver sección 5.2.2).
- Efluentes claros, pero ligeramente amarillentos o color marrón son debido a los ácidos húmicos, es una situación normal en los sistemas de tratamiento biológico, especialmente en humedales (ver Figura 4).
- A veces en el efluente se encuentra materia grasosa, sobre todo en los humedales de FH, este efecto también pueden ser causado por sustancias húmicas.

Si es posible, de vez en cuando, deben ser analizados profesionalmente en un laboratorio de agua muestras de los efluentes, especialmente cuando el efluente es reutilizado para el riego.

7 Referencias y fuentes adicionales

Nota: Todos los documentos que están libres de copyright, se proporciona un acoplamiento del URL. Los artículos periodísticos utilizados de sitios Web se pueden comprar en www.sciencedirect.com o www.iwaponline.com para ver los resúmenes o ver las instrucciones.

Artículos de revista la "Ciencia y Tecnología del Agua" pueden verse usando www.sciencedirect.com hasta el volumen 40, y del volumen 40 en adelante están disponibles en www.iwaponline.com.

7.1 Documentación citada

Abegglen, C., Joss, A., Boehler, M., Buetzer, S. and Siegrist, H. (2009) Reducing the natural colour of membrane bioreactor permeate with activated carbon or ozone. *Water Science and Technology* **60** (1), 155-165, www.iwaponline.com.

Brisson, J. and Chazarenc, F. (2009) Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: should we pay more attention to macrophyte species selection? *Science of the Total Environment* **407** (13), 3923-3930, www.sciencedirect.com.

- Carden, K., Armitage, N., Winter, K., Sichone, O. and Rivett, U. (2007) Understanding the use and disposal of greywater in the non-sewered areas in South Africa. Report to the Water Research Commission WRC Report No 1524/1/07, South Africa, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-use-and-disposal-greywater-2007.pdf>
- Cooper, P. (2005) The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates, *Water Science and Technology* **51** (9), 81-90, www.iwaponline.com.
- Cooper, P. and Findlater, B. C. (1990) Proceedings of the International Conference on the Use of Constructed wetlands in Water Pollution Control, ISBN 978-0080407845, Pergamon Press, Cambridge, UK.
- Cooper, P. and Green, B. (1994) Reed bed treatment systems for sewage treatment in the United Kingdom- the first 10 years experience. *Water Science and Technology* **32** (3), 317-327, www.iwaponline.com.
- DWA (2000) Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen (Design of single stage aeration plants, in German). ATV-DVWK-A 131, ISBN 978-3-933707-41-3, DWA Hennef, Germany, www.dwa.de.
- DWA (2006) Arbeitsblatt DWA-A 262: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers (Principles for the dimensioning, construction and operation of constructed wetlands for municipal wastewater, in German). DWA A 262, ISBN 978-3-939057-12-3, DWA Hennef, Germany, www.dwa.de.
- Fehr, G. (2003) Welcome to the cooperative research project "Constructed Wetlands", website of F & N Umweltconsult GmbH, Hannover, Germany (company is not existing anymore). www.bodenfilter.de/engdef.htm.
- Gajurel, D. R., Benn, O., Li, Z., Behrendt, J. and Otterpohl, R. (2004) Pre-treatment of domestic wastewater with pre-composting tanks: evaluation of existing systems. *Water Science and Technology* **48** (11) 133-138, www.iwaponline.com.
- Gulyas, H. (2007) Greywater reuse – Concepts, benefits, risks and treatment technologies. International Conference on Sustainable Sanitation – Food and Water Security for Latin America, Fortaleza, Ceará, Brazil, www.tu-harburg.de/aww/publikationen/pdf/Gulyas.pdf.
- Gutterer, B., Sasse, L., Panzerbieter, T. and Reckerzuegel, T. (2009) Decentralised wastewater treatment systems (DEWATS) and sanitation in developing countries - a practical guide. Ulrich, A., Reuter, S. and Gutterer, B. (eds.) WEDC, Loughborough University, UK in association with BORDA, Germany. www.lboro.ac.uk/wedc, partial preview here: <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-sample-only-borda-dewats-2009.pdf>.
- Gulyas, H., Choromanski, P., Furmanska, M., Mueller, N. and Otterpohl, R. (2007) Photocatalytic oxidation of biologically treated greywater in presence of powdered activated carbon. International Conference on Sustainable Sanitation, Food and Water Security for Latin America, Fortaleza, Brazil, www.tu-harburg.de/aww/publikationen/pdf/Gulyas_etal.pdf.
- Hagendorf, U., Diehl, K., Feuerpfeil, I., Hummel, A., Lopez-Pila, J. and Szewzyk, R. (2005) Microbial investigations for sanitary assessment of wastewater treated in constructed wetlands. *Water Research* **39** (20), 4849-4858, www.sciencedirect.com.
- Heers, M. (2006) Constructed wetlands under different geographic conditions: Evaluation of the suitability and criteria for the choice of plants including productive species. Master thesis, Faculty of Life Sciences, Hamburg University of Applied Sciences, Germany, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-constructed-wetlands-under-different-geographic-conditions-2006.pdf>.
- Hoffmann, H. (2008) Ejemplo para un saneamiento sostenible con reuso total de efluentes y biosólidos tratados, aplicado en el Colegio San Christóferus – Lima, Conferencia Peruana de Saneamiento, PERUSAN, Perú (in Spanish), <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/es-saneamiento-ecoficiente-coleio-lima-2008.pdf>.
- Hoffmann, H., Rued, S. and Schoepe, A. (2009) Blackwater and greywater reuse system, Chorrillos, Lima, Peru. Case study of sustainable sanitation projects, SuSanA, available in English: <http://www.susana.org/lang-en/case-studies?view=ccbctypeitem&type=2&id=70>.
- ITRC (2003) Technical and regulatory guidance document for constructed treatment wetlands, The Interstate Technology Regulatory Council Wetlands Team, USA, www.itrcweb.org/guidancedocument.asp?TID=24.
- Jenssen, P., Krogstad, T., Vråle, L. and Mæhlum, T. (2008) High performance constructed wetlands for cold climates, powerpoint presentation, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-high-performance-constructed-wetlands-2008.pdf>.
- Jordão, P. E. and Pessoa, C. (2009) Tratamento de esgotos domésticos (treatment of domestic wastewater, in Portuguese), 5ª edição ISBN 978-85-70221605, Brazil.
- Kamau, C. (2009) Constructed wetlands: potential for their use in treatment of grey water in Kenya. MSc thesis, Christian-Albrechts University, Kiel, Germany, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-constructed-wetlands-potential-for-use-2009.pdf>.
- Kraft, L. (2009) Characterisation of greywater from peri-urban areas in Nakuru, Kenya. Diploma thesis, University of Applied Sciences Weihenstephan, Germany (Fachhochschule Weihenstephan Abteilung Triesdorf), <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-characterisation-of-greywater-from-peri-urban-areas-2009.pdf>.
- Metcalf and Eddy (2003) Wastewater Engineering. International Edition: Treatment and Reuse, Fourth Edition. ISBN 978-0071122504, published by McGraw-Hill Higher Education, New York, USA.
- Mohamed, A. (2004) Planung, Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage in Syrien (Planning, construction and operation of a constructed wetland in Syria, in German). PhD thesis, University Flensburg, Germany,

<http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/de-pflanzenklaeranlage-syrien-2004.pdf>.

Molle, P., Liénard, A., Boutin, C., Merlin, G. and Ivema, A. (2005) How to treat raw sewage with constructed wetlands, an overview of the French system. *Water Science and Technology* **51** (9), 11-21, www.iwaponline.com.

Morel, A. and Diener, S. (2006) Greywater management in low and middle-income countries, review of different treatment systems for households or neighbourhoods. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-greywater-management-2006.pdf>.

Mungai, G. (2008) Impacts of long-term greywater disposal on soil properties and reuse in urban agriculture in an informal settlement - a case study of Waruku, Nairobi. MSc thesis MWI 2008/10, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-impacts-of-long-term-greywater-disposal-on-soil-properties-2008.pdf>.

ÖNORM (2009) B 2505: Bepflanzte Bodenfilter (Pflanzenkläranlagen) – Anwendung, Bemessung, Bau und Betrieb (Subsurface flow constructed wetlands (Humedales Artificiales, diseño, construcción, y operación en alemán). Österreichisches Normungsinstitut, Vienna, Austria (in German), www.bdb.at/.

Ottosson, J. (2003). Hygiene aspects of grey water and grey water reuse. Royal Institute of Technology/SMI, TRITALWR LIC 2011, <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:7469/FULLTEXT01>.

Philippi, L. S., Sezerino, P. H., Bento, A. P. And Magril, M. E. (2006) Vertical flow constructed wetlands for nitrification of anaerobic pond effluent in Southern Brazil under different loading rates. Proceedings of 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Almada, Portugal: IWA - MAOTDR, Vol. 1, 631-639, www.gesad.ufsc.br/download/Philippi%20et%20al.%20WV%20-%2010th%20IWA.pdf.

Platzer, C. (1998) Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Stickstoffelimination in Pflanzenkläranlagen (Investigación sobre el diseño de humedales para la remoción completa de nitrógeno, en alemán). Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 6, TU Berlin, Fb. 6, PhD thesis, Technical University of Berlin, Germany (can be obtained from chr@rotaria.net)

Platzer, C. (1999) Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. *Water Science and Technology* **40**(3), 257-263, www.iwaponline.com.

Platzer, C. (2000) Development of reed bed systems - a European perspective. Proceedings of the 7th IAWQ Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Orlando, USA, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-reed-bed-systems-2000.pdf>.

Platzer, C. and Mauch, K. (1997) Soil clogging in vertical-flow reed beds - mechanisms, parameters, consequences and... solutions? *Water Science and Technology* **35**(5), 175-181, www.iwaponline.com.

Platzer, C., Hoffmann, H., Cardia, W. and Costa, R. H. R. (2007) Dimensionamento de wetland de fluxo vertical com nitrificação - Adaptação de modelo europeu para as condições climáticas do Brasil. 24. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental (ABES), Belo Horizonte, Brazil. (Dimensioning of vertical flow wetlands for nitrification – adaptation of the European model to the climatic conditions of Brazil. 24th Brazilian conference of sanitary and environmental engineering (ABES); in Portuguese), <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/es-wetland-de-fluxo-vertical-2007.pdf>.

Raude, J., Mutua, B., Chemelil, M. and Sleytr, K. (2009) Characterisation of urban and peri-urban greywater of Nakuru municipality, Kenya. 34th WEDC conference in Addis Ababa, Ethiopia, <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-greywater-nakuru-kenya-2009.pdf>.

Ridderstolpe, P. (2004) Introduction to greywater management, Stockholm Environment Institute, Sweden, Report 2004-4 <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-greywater-management-2004.pdf>.

Rustige, H. and Platzer, C. (2001) Nutrient removal in subsurface flow constructed wetlands for application in sensitive regions, *Water Science and Technology* **44** (11-12), 149-155, www.iwaponline.com.

Seidel, K. (1965) Neue Wege zur Grundwasseranreicherung in Krefeld - Teil II: Hydrobotanische Reinigungsmethode (New methods for groundwater recharge in Krefeld – Part 2: hydrobotanical treatment method, in German). *GWF WasserAbwasser* **30**, 831-833.

Sievert, W. and Schlick, J. (2009) Three examples of wastewater reuse after reed bed treatment, Dubai, Industrial Zone. Case study of sustainable sanitation projects, SuSanA, www.susana.org/lang-en/case-studies?view=ccbctypeitem&type=2&id=74.

Van Haandel, A. and Lettinga, G. (1995) Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate. ISBN 978-0471951216, John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Vymazal, J. and Kroepelová, L. (2008) Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. ISBN 978-1-4020-8579-6 Springer Science/ Business Media

WHO (2006) WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Volume 4: Excreta and greywater use in agriculture. WHO, Geneva, Switzerland, http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuw-eg4/en/index.html.

Winker, M. and von Muench, E. (2009) Technology review on urine diversion components. Overview of urine diversion components such as waterless urinals, urine diversion toilets, urine storage and reuse systems. German Technical Cooperation (GIZ) GmbH, Eschborn, Germany, <http://www.gtz.de/en/dokumente/gtz2009-en-technology-review-urine-diversion.pdf>.

Winter, K.-J. and Goetz, D. (2003) The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology* **48** (5), 9-14, www.iwaponline.com.

Wood, A. (1995) Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology* **32** (3), 21-29, www.iwaponline.com.

7.2 Otras lecturas recomendadas

7.2.1 Varias publicaciones sobre humedales artificiales

Blumberg, M. (2009) Introduction to ecological engineering, case studies and solutions - constructed wetlands for wastewater treatment; (Power Point presentación en inglés sobre humedales artificiales) <http://www.susana.org/lang-en/library?view=ccbctypeitem&type=2&id=1035>.

FLL/IÖV (2008) Empfehlungen für Planung, Bau, Pflege und Betrieb von Pflanzenkläranlagen. ISBN 3-934484-88-3, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Ingenieurökologische Vereinigung e. V., Bonn, Germany, (Recomendaciones para el diseño, construcción y mantenimiento de humedales artificiales en alemán).

Geller, G. and Hoener, G. (2003) Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen ISBN-13: 978-3540401353, Springer, Berlin, Germany. (Manual para humedales artificiales, en alemán).

GTZ (2008) FAQs Constructed Wetlands. A sustainable option for wastewater treatment in the Philippines, GTZ-Philippines and Bayawan City, Philippines <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-FAQs-constructed-wetlands-2008.pdf>.

Kadlec, R. and Wallace, S. (2009) Treatment wetlands. 2nd edition, CRC press, Boca Raton, FL, USA. ISBN-978-1-56670-526-4.

Kivaisi, A. K. (2001) The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological Engineering* **16** (4), 545-560, www.sciencedirect.com.

Conferencias bianuales de IWA sobre el tema "Utilización de macrófitas para el control de contaminación del agua" (en inglés):

- Vienna, Austria, 1996
- Aguas de São Pedro, Brasil, 1998
- Orlando, FL, USA, 2000
- Arusha, Tanzania, 2002
- Avignon, France, 2004
- Lisbon, Portugal, 2006
- Indore, India, 2008
- Venice, Italy, 2010
- Perth, Australia, 2012 (preparación)

Más informaciones: IWA Water Wiki site of the Specialist Group at www.iwawaterwiki.org/.

Revistas de IWA con ponencias seleccionadas sobre el tema de humedales artificiales (en inglés):

- *Water Science and Technology* **35** (5), 1997
- *Water Science and Technology* **40** (3), 1999
- *Water Science and Technology* **44** (11-12), 2001
- *Water Science and Technology* **48** (5), 2003
- *Water Science and Technology* **51** (9), 2005
- *Water Science and Technology* **56** (3), 2007

Conferencias bianuales de WETPOL sobre el tema "Control y dinámica de procesos de tratamiento en humedales" en inglés "Wetland Pollution Dynamics and Control (WETPOL)" conferencias: www.wetpol.org

- Ghent, Belgium, 2005
- Tartu, Estonia, 2007
- Barcelona, Catalonia (Spain), 2009
- Prague, Czech Republic, 2011

Revistas de WETPOL con ponencias seleccionadas (en inglés)

- *Science of the Total Environment* **380** (1-3), 2007
- *Science of the Total Environment* **407** (13), 2009
- *Ecological Engineering* **35** (2), 2009
- *Ecological Engineering* **35** (6), 2009

Página web en alemán e inglés sobre un proyecto de investigación de diversas instituciones alemanas sobre el uso de humedales artificiales, página web diseño K. Tempel y H. Kolster, 2003; propietario: G. Fehr (en alemán y inglés: www.bodenfilter.de/engdef.htm) (design: K. Tempel y H. Kolster, 2003; propiedad: G. Fehr).

7.2.2 Casos de estudio de Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA)

Estudios de caso sobre proyectos de saneamiento sostenible con humedales artificiales se encuentran en: <http://www.susana.org/case-studies> (en inglés y español)

7.3 Fotos y dibujos técnicos

La GIZ publicó una gran colección de fotos de humedales artificiales en la página de Flickr.com, se encuentra buscando las palabras "constructed wetlands":

<http://www.flickr.com/photos/gtzecosan/sets/72157622652353912/>

Diseños técnicos de diversos humedales artificiales pueden ser encontrado en

<http://www.susana.org/lang-en/library/rm-technical-drawings>

8 Apéndice

8.1 Apéndice 1: Caracterización de los efluentes domésticos y aguas grises

8.1.1 Efluentes domésticos

Las aguas residuales domésticas son una mezcla de todos los efluentes de una casa, es decir, de baños, sanitarios, lavandería y cocina. Las aguas residuales municipales contienen las aguas residuales domésticas, más las aguas residuales industriales, escorrentía de aguas pluviales y de infiltración de agua.

Tabla 8. Valores típicos de los factores de carga en las aguas residuales crudas.

Carga g/hab·d	Brasil ^a	Perú ^b	Alemani ^a ^c	EEUU ^d
DBO ₅ (g)	54	50	60	85
DQO (g)	-	-	120	198
SST (g)	90	90	70	95
NTK (g)	10	12	11	13
Total P (g)	-	3	1,8	3
Aceite y grasa	15 ^e	-	-	31
Agua potable (L/hab·d)	100-300^f	150-250	100-150^f	190-460

^a Jordão y Pessoa (2005)

^b Norma de Saneamiento S.090 (1997) Resolución Ministerial N° 048-97-MTC/15 VC del 27/01/97 Reglamento Nacional de Construcciones, Perú

^c DWA (2000), 85% del valor

^d Metcalf and Eddy (2003)

^e Basado en valores de concentración de aceite y grasa en Brasil

^f Basado en valores de concentración del DBO₅ en Brasil/ Alemania

La caracterización de las aguas residuales domésticas se suele expresar como la carga por habitante, y los valores típicos están bien documentados en países industrializados, pero no tanto en los países en vías de desarrollo.

La carga (de DBO₅ descargados por los individuos varía en un rango relativamente estrecho (ver Tabla 8), y esta variación se debe principalmente a la diferencias en dieta, así como el estatus socio-económico. En los países en vías de desarrollo como Egipto, India, Palestina, Zambia o Kenya, la carga de DBO₅ son sólo alrededor de 30 g por persona al día (Metcalf y Eddy (2003); Jordão y Pessoa (2009)).

El caudal y la concentración del agua residual es el resultado del consumo de agua potable. El consumo de agua per cápita puede variar enormemente entre países o incluso dentro del mismo país debido a los diferentes niveles de sociales o estructuras tarifarias que promueven o no un uso racional

La capital peruana Lima, por ejemplo, está situada en un desierto, pero los hogares ricos utilizan hasta 400 litros de agua por persona al día, mientras que las personas que

viven en asentamientos informales, sin suministro de agua de uso público sólo consumen 20 litros por persona al día²⁸ .. 35

En contraste con la situación de Lima, en Alemania el menor consumo de agua se debe a un uso más consciente y a los precios más altos del agua. El bajo consumo de agua tiene como resultados aguas residuales más concentradas, aunque las cargas por habitante (como g DQO/hab/d) siguen siendo las mismas, independientemente del consumo de agua respectiva.

La caracterización de las aguas residuales domésticas no se completa sin hablar de la presencia de patógenos. Este aspecto se examina por separado en sección 8.2.

8.1.2 Aguas grises

Las aguas grises se definen como aguas residuales domésticas sin la descarga del inodoro. Por lo tanto no debe contener orina ni heces, pero en la práctica puede contener trazos de ambos, y por lo tanto presencia de los agentes patógenos. Para una estimación de la cantidad, ver Ridderstolpe (2004) y Ottoson (2003). Los agentes patógenos en las aguas grises vienen principalmente de las siguientes vías de contaminación:

- lavado de la zona anal en la ducha o el baño.
- Lavado de pañales o ropa interior.
- Re-afloramiento de las bacterias fecales (bacterias en particular) en el tanque de recolección de las aguas grises.

Las aguas grises son la aguas residuales que provienen de fuentes tales como duchas, baños, lavamanos, lavandería, limpieza de pisos, fregaderos y similares. En comparación con las aguas residuales domésticas, las aguas grises tienen significativamente cargas de materia orgánica, nutrientes (nitrógeno ni fósforo) y patógenos más bajas por habitante. Los valores estándares para estas cargas no existen porque las características de las aguas grises varían ampliamente, dependiendo de la fuente del agua gris.

La concentración de materia orgánica en las aguas grises pueden diferir significativamente de las aguas residuales domésticas: la concentración de materia orgánica es menor cuando las aguas grises son sólo de duchas y lavanderías, pero cuando las aguas grises son de cocinas y restaurantes son mucho mayores.

Un análisis detallado de las características de las aguas grises ha sido publicado por Ridderstolpe (2004) para las condiciones suecas y por Gulyas (2007) para las condiciones alemanas. Características de aguas grises en Sudáfrica y Kenia han sido analizados por Cardona et al. (2007), Mungai (2008), Kraft (2009) y Raude et al. (2009).

El tratamiento y reutilización de aguas grises como parte del concepto saneamiento ecológico (ecosan), es relativamente nuevo ya menudo se considera como una forma más simple de tratamiento de aguas residuales, pero aún falta más experiencia. La mayoría de las tecnologías de tratamiento de aguas grises se derivan del tratamiento de aguas residuales

²⁸ El mínimo necesario para mantener la vida saludable según la OMS es de 20 litros de agua por persona al día, (ver WHO 2003 "Water, health and human rights", en inglés), http://www.who.int/water_sanitation_health/humanrights/en/.

convencionales y sin ser desarrolladas específicamente para el tratamiento de aguas grises.

La cantidad de aguas grises generadas depende del nivel de ingreso del hogar. Como regla general: la clase alta produce más aguas grises. Los hogares sin conexión en la casa de agua potable producen las aguas grises más concentradas, debido al menor consumo de agua y las prácticas existentes de reutilización: El agua es utilizada por primera vez para la higiene personal, y posteriormente, para lavar la ropa o para lavar el piso.

Para los hogares con sanitarios secos, letrinas, sanitarios con desviación de orina y deshidratación²⁹ de excretas o con baños o/y letrinas composteros, la producción de aguas grises es igual a la producción total de aguas residuales de la casa.

Mientras que, para los hogares con inodoros de arrastre hidráulico, la producción de aguas grises son igual al flujo de aguas residuales totales menos la utilizada para la descarga del inodoro. Las aguas residuales del inodoro se denominan "aguas negras" y la cantidad de descarga depende del tipo de sanitario. Normalmente, el volumen varía entre 40 a 60 L / (hab/d).

La cantidad de producción de agua gris se midió en proyectos de saneamiento sostenible en el Perú y Brasil por los autores principales:

- Lavado de manos en baños públicos: de 0,5 a 1 L de agua por evento de lavado.
- Tomar una ducha de 5 minutos: 40 L de agua
- Preparar una comida básica para tres platos en un restaurante y después lavar los platos: 25.5 L de agua.

El uso específico de agua depende de la región, de costumbres y de las instalaciones sanitarias, también la composición de estos efluentes son diferente y, a veces difíciles de predecir. Algunos ejemplos se dan abajo.

Aguas grises de las duchas o lavandería:

- Estas aguas grises contiene detergentes, de los cuales depende la degradabilidad del producto, se recomienda usar detergentes biodegradables. Las fibras textiles y el cabello humano a menudo son mal retenidos en el pre-tratamiento de las aguas grises, pudiendo causar problemas en las bombas y válvulas. Por esto se requiere una limpieza regular de bombas y válvulas.
- Hábitos inesperados tales como orinar en la ducha podrían dar lugar a problemas de olor en el reservorio de aguas grises antes de su tratamiento (albergues, espacios deportivos, jardines o lugares de camping).

Aguas grises de cocinas, panaderías y restaurantes:

- Este tipo de aguas grises pueden tener una carga orgánica muy elevada, con restos de comida, aceites y grasas que pueden resultar en una alta concentración de materia orgánica de más de 500 mg DBO₅/ L. En este caso un pre-tratamiento anaeróbico con el uso de biogás puede ser una opción adecuada, especialmente en climas cálidos.

- Las aguas grises de los lavaderos de la cocina puede tener una gran cantidad de arena del lavado de verduras, pero la mayoría de las trampas de grasas convencionales no están diseñadas para eliminar la arena. Ver sección 4.3 para solución de este problema.
- Además, el uso de ceniza para lavar la vajilla puede causar problemas de obstrucción en el humedal, especialmente cuando el efluente se mezcla con el jabón de las aguas residuales de la lavandería: cenizas y jabón forman un coagulante que puede pasar la trampa de grasa, pero permanece en la superficie y entrada del humedal. Por lo tanto, con este sistema de tratamiento el uso de ceniza para lavar la vajilla no es recomendado.

8.2 Apéndice 2: Patógenos y su remoción en humedales construidos artificiales

Los patógenos que se transmiten por las aguas residuales o aguas contaminadas (enfermedades transmitidas por el agua) son, por ejemplo (OMS, 2006):

- Bacterias: *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Vibrio cholerae*, *Shigella*, *Legionella*, *Leptospira*, *Yersinia*.
- Protozoos: *Entamoeba*, *Giardia* y *Cryptosporidium*.
- Helmintos (lombrices intestinales): *Ascaris*, *Enterobios*, *Tenia*, *Schistosoma*, *Trichuris*, *Fasciola*.
- Virus: *Adeno-*, *Entero -*, *Hepatitis A-*, *Polio-*, *Rota-Virus*³⁰

Las enfermedades típicas son las diarreas inespecíficas, con calambres y vómitos, náuseas, deshidratación o fiebre tifoidea, cólera, poliomielitis o también enfermedades respiratorias (tales como adenovirus). Las concentraciones de los microorganismos y patógenos en aguas residuales crudas se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Concentraciones típicas de microorganismos y patógenos en aguas residuales crudas domesticas.

Concentración (NMP /100ml)	Brasil ³¹	USA ³²	Valores típicos en el mundo ³³
Coliformes Termotolerantes	10 ⁶ -10 ¹⁰	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁸ -10 ¹⁰
Huevos de Helmintos	10 ¹ -10 ³	10 ¹ -10 ³	10-10 ³
Quistes de <i>Giardia</i>	10 ² -10 ⁴	10 ³ -10 ⁴	10 ² -10 ⁵
Quistes de <i>Cryptosporidium</i>	10 ¹ -10 ²	10 ¹ -10 ³	10-10 ⁴

Bacteria:

La mayoría de las bacterias coliformes termotolerantes no son patógenas, pero la probabilidad de que bacterias patógenas sean transmitidas sólo puede ser minimizada mediante la reducción total de la concentración de bacterias. Es importante mencionar, que las bacterias sobreviven en clima caliente por mucho tiempo (OMS, 2006)³⁴.

³⁰ El virus VIH, que es responsable del SIDA, no se trasmite con aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2003).

³¹ Jordão y Pessoa (2005)

³² Metcalf y Eddy (2003)

³³ WHO (2006), volumen 2

³⁴ Esto podría llevar a más problemas con enfermedades transmitidas por el agua como resultado del cambio climático en las regiones donde las aguas residuales no son tratadas.

²⁹ Detalles sobre los baños secos con desviación de orina/ (UDDT urine diversion dehydration toilet), Winker y von Muench (2009).

Huevos de helmintos:

La prevalencia de infecciones por helmintos en el mundo se correlaciona claramente con la cobertura de saneamiento. Las tasas de infecciones de la población, especialmente en niños, de países en desarrollo pueden ser muy altas.

Los helmintos son transmitidos por sus huevos o quistes, los que son resistentes a la desinfección con cloro y son relativamente grandes (10 a 100 micras) (Metcalf y Eddy, 2003). Por lo tanto, la sedimentación en el pre-tratamiento con un largo tiempo de retención en el estanque, seguido por la filtración en los humedales artificiales muestra buenos resultados de eliminación.

Los huevos de helmintos permanecen en el lodo del estanque de estabilización de los residuos y otros procesos de sedimentación, y pueden sobrevivir durante más de 10 años (Metcalf y Eddy, 2003). Por esto los lodos generados en el pre-tratamiento deben ser tratados antes de que sean utilizados en la agricultura, el tratamiento debe ser capaz de desactivar los huevos.

Los huevos de helmintos no se ven afectados por la cal (carbonato de calcio), o la digestión mesofílica ni por vermicompostaje (compostaje con lombrices de tierra). Los posibles métodos de tratamiento para inactivar los huevos de helmintos de las heces es el compostaje en pila termofílica (temperatura > 60°C) o el almacenamiento a largo plazo (OMS, 2006, volumen 4).

Protozoarios y virus:

Protozoarios como Giardia y Cryptosporidium tienen un impacto significativo sobre las personas que tienen comprometido el sistema inmunológico. La infección es causada por la ingestión de agua contaminada y los quistes que son excretados con las heces y que son muy comunes en las aguas residuales. La eficiencia de eliminación (por gravedad o filtración por ejemplo) de estas pequeñas partículas (3-14 µm) es la misma que la del virus.

Cada etapa de tratamiento elimina algunos patógenos. En términos generales, los sistemas altamente cargados y con poco tiempo de retención hidráulica eliminan menos patógenos que los sistemas con baja carga y largos tiempos de retención (ver cuadro Tabla 10).

Tabla 10. Reducción de microorganismos según el proceso de tratamiento (por logaritmo OMS 2006, vol. 2).

Tratamiento	Bacteria	Helmintos	Protozoos	Virus
Tratamiento primario	0-1	0-1	0-1	0-1
Digestión anaeróbica, UASB	0,5-1,5	0,5-1	0-1	0-1
Humedal artificial	0,5-3	1-3	0,5-2	1-2
Laguna de estabilización	1-6	1-3	1-4	1-4

Experiencias en Europa mostraron que los HHAA FS, con flujo vertical y eficiente pretratamiento (tanque séptico o tanque Imhoff) producen efluentes con alrededor de 10⁴ bacterias de coliformes fecales (Hagendorf, 2005) que es un

buen resultado. La eficiencia de remoción de patógenos depende del tiempo de retención y del material de filtrado: HFH son más eficientes que HFV, y la arena es siempre mucho más eficiente que la grava.

Algunas aplicaciones de reutilización requieren una desinfección final de efluente en la etapa de tratamiento terciario, tales como:

- Cloro y compuestos de cloro, causan la oxidación de toda la materia orgánica, Cloro es tóxico para las bacterias y también para todos los demás organismos.
- La radiación UV, trabaja causando daños fotoquímicos en los patógenos. La desinfección con radiación UV es más cara que con cloro, pero está exenta de riesgos ambientales y de salud.
 - Quistes y oquistes no son inactivados por la desinfección con cloro convencional, mientras que la desinfección UV parece ser muy eficaz (Metcalf y Eddy, 2003).
 - Los virus son inactivados por el cloro, pero la radiación UV parece ser más eficaz para la inactivación de virus (Metcalf y Eddy, 2003).

Un buen pretratamiento con un tiempo prolongado de retención en el HA FSS con cama de arena es el mejor diseño posible, eficaz para la eliminación de patógenos de los humedales artificiales.

8.3 Apéndice 3: Distribución recomendada de tamaño de grano en HHAA FS

Es importante prestar atención al tamaño del grano de la arena utilizada como material de filtrante en los HHAA de flujo subsuperficial. El aspecto más importante es que el tamaño del grano sea suficientemente grueso. El d_{10} (ver en la figura siguiente), corresponde al tamaño de grano que en una muestra permite que solo un 10% en peso de la misma sea más pequeño, debe estar entre 0,1 mm y 0,4 mm. Idealmente, el d_{10} debe estar más cerca de 0,4 mm. El d_{10} de la arena no debe tener un grosor mayor a 0,4 mm ya que el efecto de filtración en el lecho se deterioraría. Cuanto más empinada³⁵ sea la curva de tamizado mejor.

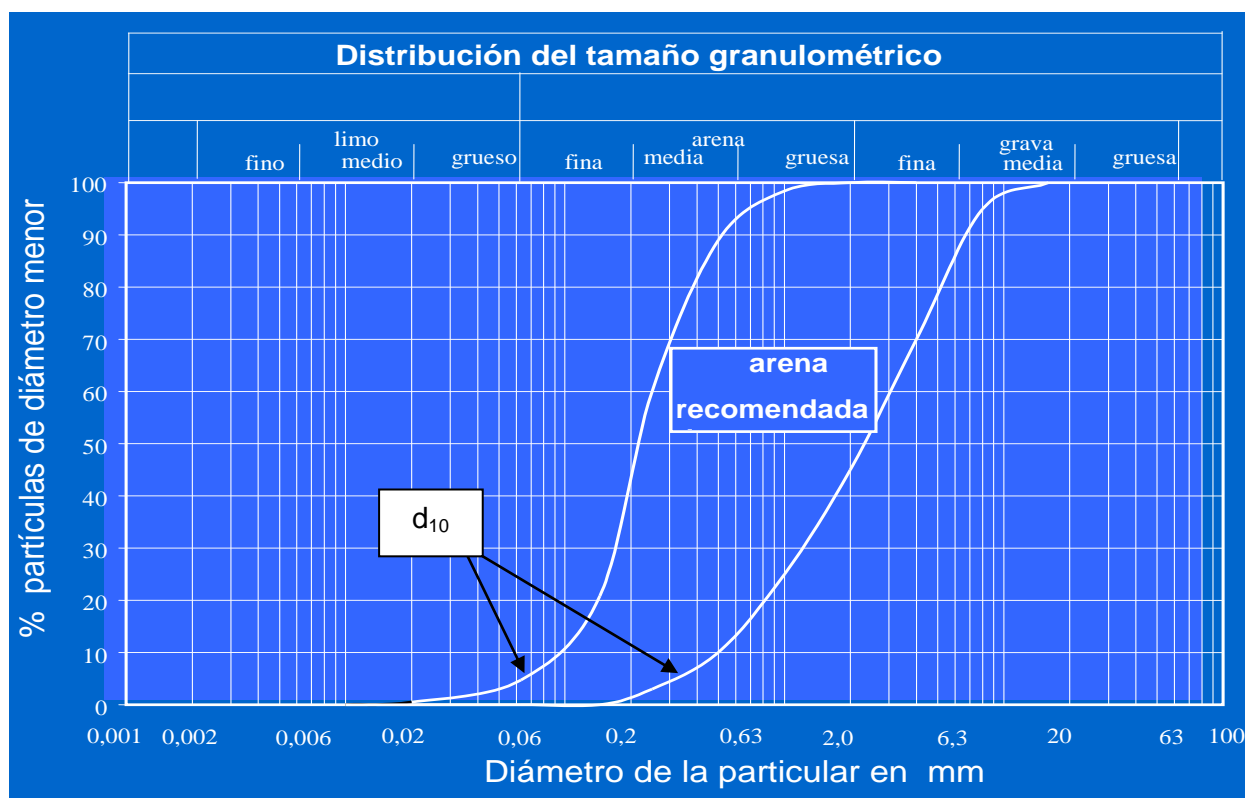


Figura 32. Recomendaciones de distribución del tamaño del grano de arena en HHAA de flujo subsuperficial (fuente Platzer, 1998). La curva de tamizado de la arena debe estar entre las dos curvas que se indican en el gráfico.

³⁵ Mas empinada significa material más uniforme.



Published by:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn / Germany
T +49 6196 79-0
F +49 6196 79-1115
E info@giz.de
I www.giz.de

partner of

**sustainable
sanitation
alliance**