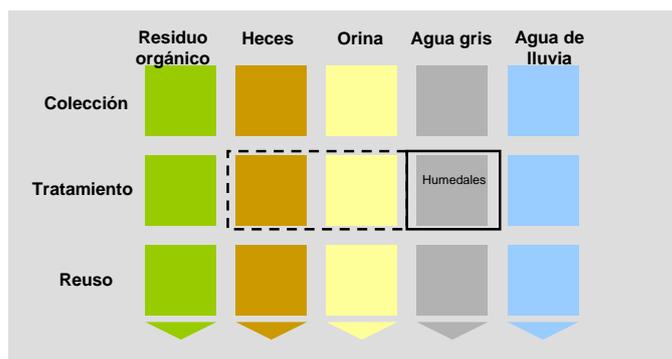


Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo

Borrador



Prefacio y menciones

Querido Lector,

El trabajo de este documento comienza en el 2006 y ha sido continuado a lo largo de estos años por consultores miembros de GTZ. Los dos objetivos principales de esta publicación es dar una visión general de los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HHAA FS) para el tratamiento de agua gris y agua residual doméstica para países en desarrollo, e indicar al lector la mejor dirección para seguir documentándose sobre este tema.

La versión final de éste documento ha sido desarrollada por la Dra. Heike Hoffmann y el Dr. Christoph Platzer, Rotaria del Perú SAC y Rotaria do Brasil LTDA, ambos profesionales del campo de humedales desde hace más de 15 años.

Otros colegas que también contribuyeron en la elaboración de este documento son Prahlad Lamichhane, Cynthia Kamau y Susanne Bolduan.

Por favor si encuentras alguna omisión o error envía un correo electrónico a ecosan@gtz.de para la retroalimentación del documento.

Esperando que encuentres ésta publicación util para los proyectos ecosan y actividades de difusión

Los saluda cordialmente

Dra. Elisabeth von Münch

Jefa del Programa "Saneamiento Sostenible - Ecosan" de GTZ

© Diciembre 2009

Autora: Dra. Elisabeth von Münch

Por favor envíenos sus comentarios y sugerencias a la dirección de correo electrónico dado líneas abajo. Esperando tener noticias de usted.

Agencia de la Cooperación Técnica Alemana(GTZ) GmbH

Saneamiento sostenible- programa ecosan

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn, Germany
T +49 6196 79-4220
F +49 6196 79-7458
E ecosan@gtz.de
I www.gtz.de/ecosan

Este documento esta disponible en:
<http://www.gtz.de/en/themen/umwelt-infrastruktur/wasser/9397.htm>

partner of

**sustainable
sanitation
alliance**

Contenido

1	Resumen	5
2	Introducción a Humedales de Flujo Subsuperficial (HHAA FSS)	5
2.1	Público objetivo de esta publicación	5
2.2	Ámbito de aplicación de este documento	5
2.3	Caracterización del tratamiento en los Humedales Artificiales (HHAA) y su desarrollo histórico	5
2.4	Clasificación de los HHAA y el rango de aplicación internacional	6
2.5	¿Por qué elegir el humedal? Comparación con otras plantas de tratamiento de aguas residuales	7
3	Condiciones para el diseño de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FSS)	7
3.1	Principios del tratamiento de HHAA FSS	7
3.2	Recomendaciones básicas para el diseño de HHAA FSS	8
3.3	Plantas utilizadas en HHAA FSS	10
3.4	Características de las aguas residuales domésticas y de las aguas grises y las consecuencias para el tratamiento en HHAA	11
3.5	Tratamiento primario de aguas residuales domésticas y aguas grises antes de entrar al HA FSS	13
3.6	Aspectos del reuso	15
4	Diseño de Humedales Artificiales de flujo sub-superficial (HHAA FSS)	17
4.1	Lecho de Flujo Horizontal (FH)	17
4.2	Humedales de Flujo Vertical (HFV)	18
4.3	Ejemplos de proyectos y experiencias de humedales de FH y FV de aguas residuales y tratamiento de aguas grises	20
4.4	El " Sistema Francés" para combinar el tratamiento primario y secundario de aguas residuales crudas	21
4.5	Indicación de Costo	22
5	Recomendaciones de operación y mantenimiento	23
5.1	Tareas comunes para todos los tipos de HHAA	23
5.2	Tareas comunes para la explotación de HFH	24
5.3	Tareas habituales para el funcionamiento de HFV	24
6	Referencias	25
6.1	Referencias usadas en este documento	25
6.2	Otras lecturas recomendables	26
6.3	Fotos	26

Índice de Tablas:

Tabla 1. Lista de contaminantes removidos en los procesos HHAA FSS	7
Tabla 2. Valores típicos de los factores de carga en las aguas residuales crudas	11
Tabla 3. Concentración de microorganismos en aguas residuales crudas	16
Tabla 4. Registro de las unidades de Reducción de los agentes patógenos excretados por los procesos de tratamiento seleccionado (de la OMS Parte 2)	16
Tabla 5. Regla de los números pulgares para estimar el requerimiento de área en diferentes condiciones climáticas de las aguas residuales comunales, ejemplo para 50 pe. (¡Sólo se utiliza para el control, nunca para diseñar HHAA!).....	20
Tabla 6. Ejemplo para el cálculo de carga de aguas grises y aguas negras en un colegio de Lima / Perú con 70 pe. que dio como resultado la ocupación de áreas separada para los humedales de FV. Las aguas grises no estaban totalmente separadas de las aguas negras.	20
Tabla 7. Las tasas de extracción (en%) de humedales de FH y FV (HHAA FSS) para el tratamiento de aguas grises.	20
Tabla 8. Ejemplo de área requerida para HHAA de FSS de FV (para más detalles ver estudios de caso SuSanA).	21

Índice de Figuras:

Figura 1 Planta urbana descentralizada de tratamiento de aguas grises con un HA FSS en Klosterenga en Oslo, Noruega (Fuente: L. Ulrich, 2008).....	5
Figura 2. Planta descentralizada para el tratamiento de aguas grises con un humedal artificial en una zona urbana de Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2008)	6
Figura 3. Clasificación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2008).....	6
Figura 4. HA FSS en construcción en Bayawan, Filipinas, el humedal tratará el aguas residuales de un vertedero (Fuente: J. Boorsma, 2009).....	9
Figura 5 a/b. HHAA FSS (FV) para la reutilización de aguas residuales en (a) Brasil y (b) Perú. El revestimiento para la impermeabilización es de PE, (a) los drenes del humedal son cubiertos con grava, (b) luego el humedal es llenado con arena (Fuente: H. Hoffmann, 2007)	9
Figura 6. Recomendación para la distribución del tamaño de la partícula (Platzer, 1998).....	9
Figura 7. Ejemplo del material utilizado en filtro del HA FSS para el tratamiento de aguas residuales de una comunidad en Brasil, arena gruesa del río sin ningún tipo de arcilla, ni limo (Fuente: C. Platzer, Rotaria do Brasil, 2008)	9
Figura 8 a/b. (a) raíz y sistema de rizomas del carrizo (<i>Phragmites australis</i>) (fuente: Blumberg, 2009). (b) Raíces de vetiver después de 18 meses en HFV, Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2009)	10
Figura 9. <i>Phragmites australis</i> después de dos años en HA de flujo vertical Haran-AI-Awamied cerca de Damasco, Siria (fuente: E. v. Münch, 2009).....	10
Figura 10. Papiro con 6 meses de crecimiento en un humedal de flujo vertical; Florianópolis, Brasil (fuente: C. Platzer, 2008).....	11
Figura 11. <i>Papiros egipcio</i> con 12 meses de crecimiento en un HFV: la capa superficial sin raíces, desestabiliza el proceso, por que no le permite participar adecuadamente del proceso de tratamiento en el lecho del filtro (Fuente: H. Hoffmann, 2008).....	11
Figura 12 a/b. (a) Papiro paraguas (papiro egipcio al fondo) después de 8 meses en el HFV de aguas grises, y (b) Bambú para el tratamiento de aguas grises del lavamanos y del inodoro, Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2009).	11
Figura 13 a/b Diseño de trampa de grasa (a) y trampa de grasa en uso (b) para el efluente de un caño de cocina de una casa en Lima / Perú antes del tratamiento en el humedal. (fuente: H. Hoffmann, 2010)	13
Figura 14 a/b: Diseño del tanque séptico (a) y en construcción para una casa con 15 habitantes (b) en Lima (fuente: Hoffmann, 2009)	14
Figura 15a/b: Filtro de Compost en Lima, Perú, (a) sistema con doble cámara ventilada, (b) cesta en la etapa de llenado (fuentes H. Hoffmann, 2008).....	14
Figura 16 a/b: diseño del tanque Imhoff (a) y construcción (b) en una zona rural del Perú (fuente: H. Hoffmann, 2008)	14
Figure 17: Diseño del tanque Baffled Fuente: BORDA http://www.borda.de/pdfs/DEWATS.pdf	15
Figure 18 a/b: Diseño del reactor UASB (a) (Fuente: http://www.uasb.org/discover/uasb-scheme.gif) y (b) UASB para 5.000 PE., Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, área de salida y captación del gas (en realidad, el gas no es utilizado, fuente: H. Hoffmann 2007)	15

Figura 19 a/b (a) Agua gris pre-tratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de cultivos, (b) Agua negra pre-tratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de áreas verdes, las aguas residuales con coloración marrón son típicas y es causado por las huminas (fuentes: H. Hoffmann, 2008)	15
Figura 20. Esquema de la sección transversal del humedal de flujo horizontal (HFH), HHAA FSS (fuente: Morel y Diener, 2006).....	17
Figura 21. Esquema de la sección transversal del flujo horizontal FH-HHAA FSS) con pre-tratamiento (fuente: http://www.bodenfilter.de/engdef.htm).....	17
Figure 22. Humedal de flujo horizontal (HFH) para el tratamiento de aguas grises en Lima/Perú, área de entrada con grava y tubos de distribución (fuente: R. Miglio, 2009).	18
Figura 23 a/b (a) Efluente natural en un HFH y presa de obstrucción para el control en la entrada y (b) recomendación geométrica para grandes HFH (fuente: C. Platzer, 2000)	18
Figura 24. Esquema de la sección transversal del humedal artificial vertical de flujo sub-superficial (fuente: Morel y Diener, 2006).....	18
Figura 25. Esquema de la sección transversal del flujo vertical de un HA FSS con pre-tratamiento (fuente: http://www.bodenfilter.de/engdef.htm).....	18
Figura 26. Humedal recién sembrado de flujo vertical (FV) durante el bombeo (Lima, Perú) para el tratamiento de las aguas grises. Toda la superficie es utilizada como área de entrada, la cual se recubre con grava (fuente: H. Hoffmann, 2008).	19
Figura 27. Humedales construidos en la ciudad de Bayawan. El espacio se encuentra entre los lechos de flujo subsuperficial horizontal y vertical (fuente: J. Boorsma, 2009).	21
Figura 28. Sistema Francés de HHAA de FSS: 3 filtros para el tratamiento primario y 2 filtros para el tratamiento secundario, Albondón, 800 habitantes, España (fuente: T. Burkardt AKUT, 2005)	21
Figura 29. Tratamiento primario de aguas residuales crudas, etapa primaria del sistema francés (publicado por Molle et al., 2009).....	22
Figura 30. Detalles técnicos del tratamiento primario de aguas residuales crudas en el sistema francés de HHAA de FSS: Albondón, España (fuente: T. Burkardt AKUT, 2007)	22
Figura 32. Remoción de papiro (<i>Cyperus papyrus</i>) de un HFV debido a su crecimiento extremo (fuente: H. Hoffmann, Lima Perú 2009)	23
Figura 33 a/b La capa superficial de raíces desestabiliza el sistema al obstruir las tuberías de distribución con raíces y humus (tratamiento de aguas negras en operación después de 2 años. (Fuente: H. Hoffmann, 2009)	23
Figure 34: Vetiver segado de un HFV después de 8 meses de sembrado, cuando los tallos empezaron a quebrarse, luego fueron utilizados como paja para el filtro de compostaje de aguas negras, Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2009).....	24
Figure 35. Humedal de flujo horizontal con estructura de entrada (plant Broad-leaved cattail planta espadaña de hoja ancha), Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú (fuente: Miglio, 2009).....	24
Figure 36 a/b: (a) Limpieza de la tubería de distribución, abriendo y cerrando las válvulas y las tapas durante la fase de bombeo, (b) tapa abierta de una tubería de distribución bloqueada (fuente: H. Hoffmann, 2009)	24

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 tecnología simple, con un óptimo costo, un uso eficaz y bajas exigencias operativas. Un aspecto especial de gran importancia es el uso de HHAA para el tratamiento de aguas grises, los cuál desempeñan un papel importante en el rol de integrar los conceptos de ECOSAN.

Mientras que el término "Humedales Artificiales" es utilizado para una amplia gama de tratamientos alternativos, **esta publicación se enfoca sólo a Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HHAA FSS), 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. En especial, los humedales de flujo vertical que pueden soportar picos de corta carga sin influir en la calidad de los efluentes. Sin embargo, todos los tipos de HHAA son críticos para situaciones de sobrecarga a largo plazo. También debido a la falta de tratamiento primario pueden perder la capacidad de tratamiento de lodos o grasas que pasan por los humedales. El diseño de los humedales tiene que considerar siempre las circunstancias locales específicas, tales como clima (temperatura), disponibilidad de tierras y la reutilización prevista o vía de eliminación del efluente.

La aparente simplicidad del sistema a menudo lleva a la conclusión de que ésta tecnología no necesita conocimientos especiales. Pero la mayoría de HHAA que presentan deficiencias, se debe a los errores de diseño o falta de mantenimiento. El proceso de tratamiento se basa en la filtración biológica dada por la fijación del biofilm que se compone de bacterias aerobias y facultativas. La eficiencia de los procesos de tratamiento aeróbico depende de la relación entre la demanda de oxígeno (carga) y el suministro de oxígeno (diseño) y necesita de profesionales con conocimientos de tratamiento de aguas residuales para hacer el diseño de estos sistemas biológicos complejos.



Figura 1 Planta urbana descentralizada de tratamiento de aguas grises con un HA FSS en Klosterenga, Oslo - Noruega (Fuente: L. Ulrich, 2008).

Los Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial (HHAA FS) se pueden diseñar con flujo vertical u horizontal. Una idea de HHAA FSS se da en la Figura 1 y Figura 2. Los lechos de Flujo Vertical (FV) tienen un rendimiento más eficiente en el tratamiento con una menor área de ocupación. Por otra parte, la eficacia del tratamiento depende del intervalo en que se entrega la carga (de 4 a 8 veces al día)

por lo que necesita un mayor conocimientos técnicos en el diseño, en cambio los humedales de Flujo Horizontal (FH) se alimentan normalmente de un flujo constante. Estos son más fáciles de diseñar y hasta ahora siguen siendo las instalaciones preferidas, especialmente en países emergentes. Los puntos críticos en los humedales de FH son la distribución de aguas residuales, una ocupación de área 2 veces mayor y con menor eficiencia de tratamiento que el FV. Desde un punto de vista de reutilización los humedales de FH no son recomendados en climas cálidos debido a sus elevadas tasas de evaporación, aunque podría ser una opción interesante para el tratamiento de aguas grises con baja carga orgánica.

Esta publicación pretende contribuir a difundir el conocimiento sobre la tecnología de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

2 Introducción a los Humedales de Flujo Subsuperficial (HHAA FSS)

2.1 Público objetivo de esta publicación

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

- desean obtener una visión general de HHAA, diseño, mantenimiento, eficiencia y componentes técnicos;
- desean conocer los documentos importantes de este ámbito para profundizar a través de la lectura;
- tengan interés en soluciones sanitarias de tecnología simple, particularmente en el contexto alternativo de reutilización.

2.2 Ámbito de aplicación de este documento

Este documento se centra en el tratamiento de *aguas residuales doméstica, municipales y aguas grises* con humedales artificiales de flujo subsuperficial compuestos por filtros de arena, aunque los HHAA también pueden ser utilizado para tratar una amplia gama de tipos de aguas residuales (aguas residuales agro-industriales e industriales, efluentes de botaderos, aguas pluviales, y otros).

Los humedales artificiales son generalmente utilizados como parte de los procesos de tratamiento descentralizado de aguas residuales. Se utilizan principalmente como plantas de tratamiento secundario, lo que significa que los efluentes siempre necesitan un tratamiento primario, que tiene que ser de acuerdo a las características del afluente

Básicamente, este documento ofrece una visión general y una orientación básica sobre el diseño y mantenimiento de humedales de flujo horizontal (FH), de flujo vertical (FV) y algunas variaciones. También, incluye la descripción de los tratamientos primarios más comunes, debido a la importancia que tienen para el buen funcionamiento del HHAA y las posibilidades de desinfección (tratamiento terciario), que pueden ser necesarios para la reutilización de *aguas residuales domésticas y municipales* tratadas.

2.3 Caracterización del tratamiento en los Humedales Artificiales (HHAA) y su desarrollo histórico

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 superficiales, subterráneas o flujos con residuos*" (ITRC 2003).

Otros sinónimos de "humedales artificiales" incluyen: humedales hechos por el hombre, de ingeniería, de tratamiento. Hay también términos diferentes para los HHAA de flujo subsuperficial (FSS), que incluyen:

- Filtros plantados en el suelo.- Tienen una vegetación que se componen de plantas macrófitas que son naturales en los humedales y se diferencian del grupo de "filtros no sembrados" (también son llamados: biofiltros subsuperficiales, lechos de percolación, lechos de infiltración o filtros intermitentes de arena).
- En Europa: "Reed Bed Treatment System" (RBTS) que en español sería "Sistema de Tratamiento en Lecho de Caña", debido a que las especies vegetales frecuentemente utilizadas en estos humedales es la caña (*Phragmites australis*).
- En los EE.UU., estos sistemas también son denominados como "Lechos de Plantas Sumergidas" (VSB, por su siglas en inglés), vegetación en lecho de grava o sistemas en lecho de roca y filtros hidropónico en lecho de gravas.

Este gran número de términos hace que la literatura se fragmente y confunda al principiante que está en la búsqueda de información.

Históricamente, los humedales naturales fueron utilizados como sitios de descarga de aguas residuales. Esto se hizo principalmente como medio de eliminación y no como tratamiento. Esta tendencia fue llevando a muchos humedales, tales como pantanos, a saturarse de nutrientes y posteriormente a la degradación ambiental.

Los HHAA han sido utilizados por más de 40 años para el tratamiento de aguas residuales en casi todas las regiones del mundo. La primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales en plantas de humedales fueron realizadas 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.

Hoy en día los humedales de flujo subsuperficial son parte de las diferentes posibilidades de tratamiento de aguas residuales, como cualquier otra técnica de tratamiento, así como también lo son las lagunas de tratamiento en muchos países desarrollados (ej. Alemania, Inglaterra, Francia, Dinamarca, Polonia, Italia, etc),



Figura 2. Planta descentralizada para el tratamiento de aguas grises con un humedal artificial en una zona urbana de Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2008)

2.4 Clasificación de los HHAA y el rango de aplicación internacional

Los HHAA se clasifican por el régimen del flujo de agua: **Humedal de Flujo Superficial** (HFS) y **Humedal de Flujo Subsuperficial** (HFSS), (véase la Figura 3. Clasificación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2008)

); y por el tipo de crecimiento de los macrófitos. Los diferentes tipos de humedales construidos pueden ser combinados entre sí (los llamados sistemas híbridos) con el fin de explotar las ventajas específicas de los diferentes sistemas. Para aplicaciones urbanas, el sistema de flujo subsuperficial (HHAA FSS) frecuentemente es más usado que el HFS, ya que tienen una mayor eficiencia en el tratamiento y necesita menos espacio.

Tanto la base de suelo como la base de grava son los conceptos predominantes en el sistema de flujo subsuperficial (HHAA FSS) en Europa, África, Sudáfrica, Asia, Australia y Nueva Zelanda.

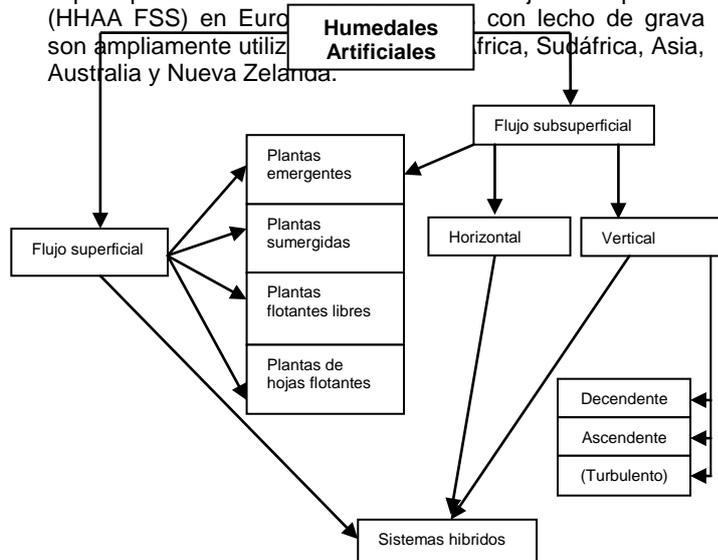


Figura 3. Clasificación de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales (adaptado de Vymazal & Kröpfelová, 2008)

El uso de HHAA para el tratamiento de aguas residuales es cada vez más aceptada en muchas partes del mundo. En los países desarrollados los HHAA tienen muy alto potencial, pero aún así tienen que ganar una mayor aceptación y sus potenciales necesitan ser más conocidos (Medina, 2004; Heers, 2006; Kamau, 2009).

Los HHAA modernos pueden ser utilizados para una variedad de aplicaciones:

1. Tratamiento de aguas residuales municipales
2. Tratamiento de agua residuales domésticas (descentralizadas)
3. Tratamiento de aguas grises
4. Pre-tratamiento de aguas residuales crudas ("Sistema Francés")
5. Tratamiento terciario de efluentes pre-tratados en plantas convencionales de aguas residuales
6. Tratamiento de aguas residuales industriales
7. Tratamiento y retención de aguas pluviales
8. Tratamiento natural de ríos y lagos contaminados
9. Deshidratación de lodo y minerales
10. Tratamiento natural de agua de piscinas

Esta publicación se enfoca en los cuatro primeros puntos de la lista anterior. Sin embargo, el uso de HHAA para tratamiento terciario (5), tratamiento de aguas residuales industriales (6), e incluso para el tratamiento de lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales (9) a menudo puede ser una alternativa económicamente interesante. Para la lectura especializada, se recomienda las publicaciones del IWA o las conferencias bienales publicadas, tal como en Water Science (por ejemplo, Water Science & Technology Vol 35 ó 51, sólo para citar dos publicaciones de la conferencia)

2.5 ¿Por qué elegir humedales artificiales? Comparación con otras plantas de tratamiento de aguas residuales

Los HHAA FSS tienen un alto potencial para la descentralización de los tratamientos de aguas residuales o aguas grises, sin embargo no son la única tecnología y no siempre la solución más económica (véase la sección 4.5). La tecnología de tratamiento debe ser cuidadosamente seleccionada teniendo en cuenta una serie de aspectos.

La necesidad de disponer de áreas relativamente grandes y la necesidad de cierto volumen de arena gruesa puede limitar el uso de HHAA FSS, especialmente en gran escala para las zonas urbanas. Un humedal artificial (HA) de Flujo Vertical (FV) de 3.000 persona equivalente (PE) por ejemplo, necesita alrededor de 3.000 a 10.000 m² (dependiendo del clima y el diseño). Un Humedal de Flujo Horizontal (HFH) necesita por lo menos el doble de ésta área. En clima subtropical los humedales de FH tienen el mismo requerimiento en superficie que las lagunas de tratamiento. En climas frío las lagunas necesitan una mayor superficie que los HHAA FH, por eso en la mayoría de las situaciones urbanas, ambas tecnologías no pueden ser utilizadas para centralizar las plantas de tratamiento de aguas residuales o al menos tenerlas parcialmente descentralizadas.

Los reactores de tratamiento aeróbio, que tienen una capacidad de tratamiento similar al de un HA pero con menor requerimiento de área son, por ejemplo: filtros percoladores, filtros sumergidos o plantas de lodos activados. Cuyos costos de construcción dependen de las condiciones locales, y pueden ser similares a los costos de los HHAA, especialmente cuando son plantas de gran tamaño (> 2.000 PE).

El principal argumento de los humedales en este caso es la confiabilidad operativa, especialmente cuando la capacidad de los operarios es limitada. Otro aspecto importante es la no producción de lodos en el tratamiento secundario de los humedales. A menudo, la producción de lodos de una planta de tratamiento conduce a una descarga no controlada de lodos en los ríos (esto destruye el efecto del tratamiento), un vertido no controlado en los puntos de descarga (que conduce a una posible contaminación de aguas subterráneas o problemas de salud) o a la desactivación de la planta. En estos casos el argumento de los costos de inversión es mucho menos importante que la fiabilidad y la sostenibilidad de la tecnología.

La simplicidad y confiabilidad del sistema de tratamiento de HHAA puede ser comparado con lagunas de tratamiento. Los principales argumentos para elegir entre lagunas y HHAA FSS son:

- HHAA FSS no tienen cuerpos de agua abiertos, por lo que no proporcionan el crecimiento de mosquitos.
- HHAA producen agua totalmente clara, mientras que las lagunas tienen una alta producción de algas.

- Debido a los grandes espejos de agua, a cielo abierto, las lagunas son mucho más difíciles de integrar a un vecindario.
- Cuando se dispone de terreno, las lagunas son una opción interesante para los tratamientos de grandes magnitudes (> 10.000 P.E) ya que los costos de construcción de este tamaño son inferiores a los de humedales

Además HHAA FSS son muy eficaces para plantas de tratamiento de aguas residuales como unidad de tratamiento terciario, por ejemplo después del tratamiento de lodos activados o filtro percolador. Con una menor carga orgánica, se reduce significativamente el área de ocupación (ver capítulo 4) y el HA sólo sirven como filtro de retención, compensando temporalmente las variaciones de la calidad del efluente, que son típicos en el tratamiento de reactores más compactos.

3 Condiciones para el diseño de Humedales Artificiales de flujo subsuperficial (HHAA FSS)

3.1 Principios del tratamiento de HHAA FSS

Los humedales artificiales son generalmente diseñados para la eliminación de los siguientes contaminantes en aguas residuales:

- Sólidos suspendidos (SS)
- Materia Orgánica (medidos como DBO₅ y DQO)
- Nutrientes (nitrógeno y fósforo) (no es necesario cuando el agua tratada es reutilizada para el riego)

Los HHAA son referidos a menudo como " sistemas simples de baja tecnología", pero los procesos implicados en este tratamiento están en realidad muy lejos de ser simples. Se tienen alrededor de ocho componentes en el lecho del filtro:

1. Sedimentación / lecho de arena
2. Zona de Radicular / poro de agua
3. Basura / restos
4. Agua
5. Aire
6. Plantas
7. Raíces
8. Biofilms: 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 estos componentes los humedales artificiales (HA) tienen diferentes espacios con condiciones redox¹ que desencadenan la degradación y reducción de los diversos procesos (Rustige & Platzer, 2001).

La eliminación de nutrientes no siempre es necesaria, especialmente cuando el agua tratada será reutilizada para fines de riego (Sección 3.6), los nutrientes de las aguas residuales pueden ser utilizado como fertilizante, esto es parte de muchos conceptos de ECOSAN.

Tabla 1. Lista de contaminantes removidos en los procesos HHAA FSS

Contaminantes	Procesos Removidos
Materia orgánica (MO) (medida)	<ul style="list-style-type: none"> • Partículas de MO son eliminadas por la solución o filtración, luego convertidas a

¹ Potencial de reducción es un indicador para el suministro de oxígeno

como DBO ₅ o DQO)	<p>DBO₅ soluble</p> <ul style="list-style-type: none"> La MO soluble es fijada por el biofilm y removida debido a la degradación de las bacterias adheridas (biofilms de tallos, raíces, partículas de arena, etc).
Sólidos suspendidos totales (SST)	<ul style="list-style-type: none"> Sedimentación y filtración Descomposición debido a las bacterias especializadas del suelo durante los largos tiempos de retención
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 suelo (adsorción) Precipitación con Ca, Al y Fe Absorción de las plantas (influencia limitada)
Patógenos	<ul style="list-style-type: none"> Sedimentación y filtración Absorción Depredación por protozoarios Eliminación de las bacterias por las condiciones ambientales desfavorables (pH y temperatura)
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 los largos tiempos de retención y a las bacterias especializadas del suelo (no calculable)

El lecho del filtro 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 durante un período prolongado de procesos biológicos. El tratamiento biológico en el lecho del filtro se basa en la actividad de microorganismos naturales, 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 FSS están diseñados para el tratamiento aerobio y facultativo, pero no para el tratamiento anaerobio, que sólo se produce en ausencia de oxígeno y que libera el biogás. Los procesos aeróbicos siempre necesita de la presencia de oxígeno (aire), mientras que los procesos de facultativos pueden darse en condiciones de oxígeno limitado temporalmente o en ausencia de oxígeno cuando el nitrato (NO₃) es utilizado por bacterias especializadas para la oxidación de materia orgánica, que se denomina proceso anóxico.

La bacteria del biofilm y la baja carga del sistema permite que incluso la materia orgánica menos degradable (contaminantes orgánicos, tabla 1) pueda ser descompuesto por las bacterias especializadas naturales del suelo, las cuales tienen bajas tasas de crecimiento. Toda la materia orgánica, sólidos suspendidos (tabla 1) y también sólidos generados microbiana finalmente se reducen en los procesos aeróbicos y anaeróbicos en CO₂, H₂O, NO₃, N₂ y ácidos húmicos que a menudo se quedan en el efluente. El ácido húmico es la fracción más estable de la materia orgánica, también es un compuesto natural del suelo, del lago y del río (ver sección 3.6).

Se conoce que el crecimiento de las plantas puede contribuir a reducir los nutrientes (amoníaco y fosfato), así como también ayudan a la captación de metales pesados. La razón fi-

siológica de que las plantas puedan absorber los metales pesados aún no está clara y probablemente depende fuertemente de la especie de las plantas, pero hay que tener en cuenta que los metales pesados no desaparecen, sino, permanecen en el cuerpo de la planta. Además debe quedar claro que los metales pesados no son un problema en las aguas residuales domésticas ni en la mayoría de los municipios, menos aún en las aguas grises.

La reducción de amoníaco y fosfato en las aguas residuales domésticas por el crecimiento de las plantas es de aproximadamente entre 10-20% (sólo durante el período de vegetación). Lo más importante para la eliminación del nitrógeno es la nitrificación y desnitrificación realizada por las bacterias. El amoníaco puede ser oxidado por bacterias autótrofas a nitrato (nitrificación), pero sólo se produce de manera significativa en el HA FSS vertical con el suministro de suficiente oxígeno, mientras que en el humedal de flujo horizontal se produce nitrato que puede ser reducido en condiciones anoxicas por bacterias heterotróficas de nitrógeno (N₂) (desnitrificación).

La eliminación del fósforo es posible por la absorción y la precipitación de los compuestos naturales de la arena, pero esto sólo sucede cuando los enlaces químicos se completan. Un diseño general para la eliminación de fósforo aún no ha sido desarrollado, aunque en muchos HHAA FSS se presentan un alta tasa de absorción (Rustige & Platzer, 2001).

La eliminación de nutrientes no siempre es necesaria, especialmente cuando el agua tratada será reutilizará para fines de riego (Sección 3.6), los nutrientes de las aguas residuales pueden ser utilizado como fertilizante, esto es parte de muchos conceptos de ECOSAN.

3.2 Recomendaciones básicas para el diseño de HHAA FSS

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

- Disponibilidad de suficiente espacio, porque es un "sistema de baja velocidad" con un mayor requerimiento de espacio como los sistemas convencionales (Sección 2.5).
- La vida útil esperada de un HA bien mantenido es de 20 a 30 años, para la urbanización y el desarrollo de la población considerada.
- Climas sin períodos largos de heladas son preferibles, sin embargo HHAA FSS bien diseños trabajan bien en climas fríos (Jenssen et al., 2008) (Sección 4)
- Es preferible tener condiciones totales de luz solar, pero lo que no debe ocurrir es que el humedal este completamente en la sombra, especialmente para HHAA FSS, pues es importante que la superficie se pueda secar.
- Las plantas deben estar adaptadas para las condiciones de crecer parcialmente sumergidas, en climas especiales, con luz del sol o sombra (Sección 3.3).
- Las aguas residuales en tratamientos biológicos no deberían ser tóxicas, sin embargo, los HHAA por su alto tiempo de retención son más resistentes a los eventos tóxicos que los sistemas convencionales.
- Para el mantenimiento se requiere un personal mínimo capacitado o usuarios comprometidos en llevar a cabo las tareas básicas de esta labor.

Los humedales artificiales de Flujo subsuperficial (HHAA FSS) están diseñados para mantener el nivel de agua totalmente por debajo de la superficie. Por esto a diferencia de los humedales de flujo superficial (HHAA FS), este no tiene problemas de mosquitos. La arena gruesa contribuye a los

procesos de tratamiento, proporcionando el área superficial para el crecimiento microbiano y apoya los procesos de adsorción y filtración. Este efecto resulta con una menor área demanda y generalmente con un resultado mejor que los HHAA FS. Entre los HHAA FSS existe una amplia gama de líneas de desarrollo:

- Dirección del flujo: flujo horizontal, flujo vertical (FV para abajo o FV para arriba)
- Tipo de material para la filtración: grava, arena, mezcla de arena-suelo
- Datos de diseño: Área por persona (m^2 / pe); carga orgánica (DBO_5 or $DQO/m^2,d$); carga hidráulica (mm / d); volumen de carga (DBO_5 or $DQO/m^3,d$), consumo entrada de de oxígeno
- El tiempo de retención no debe ser utilizado para fines de diseño. No es comúnmente aceptado el enfoque del diseño que utiliza el tiempo de retención.

Los principales tipos de humedales varían mucho dependiendo del país y sus líneas de desarrollo. Es común que para el tratamiento de aguas residuales en HHAA FSS sean de FH (lechos de flujo horizontal, ver 4.1) y FV (lecho de flujo vertical, ver 4.2), los que puede ser usado también en combinación. Hay algunas consideraciones generales sobre la planificación y la construcción de HHAA FSS, desarrollado a lo largo de los años, pero no todos son aceptados por todos los diseñadores de planta (Platzer 2000, adaptado a los nuevos conocimientos):

- Hacer el lecho del filtro impermeable es posible al revestirlo con plástico, arcilla o cemento. Para HFH esto siempre es necesario, para HFV (Figura 5) sólo es técnicamente necesaria cuando el efluente se volverán a usar, pero en muchos casos, las autoridades exigen una impermeabilización.



Figura 4. HA FSS en construcción en Bayawan, Filipinas, el humedal tratará el aguas residuales de un relleno sanitario (Fuente: J. Boorsma, 2009)



Figura 5 a/b. HHAA FSS (FV) para la reutilización de aguas residuales en (a) Brasil y (b) Perú. El revestimiento para la impermeabilización.

ción es de PE, (a) los drenes del humedal son cubiertos con grava, (b) luego el humedal es llenado con arena (Fuente: H. Hoffmann, 2007)

- el sustrato utilizado generalmente es arena gruesa, con una conductividad hidráulica (k_f) alrededor de 10^{-4} a 10^{-3} m/s,
- Figura 6,
- el sustrato no debe contener arcilla, limo u otros tipos de material fino, ni debe consistir de material con bordes filosos. (Figura 7 ilustración de arena recomendada)

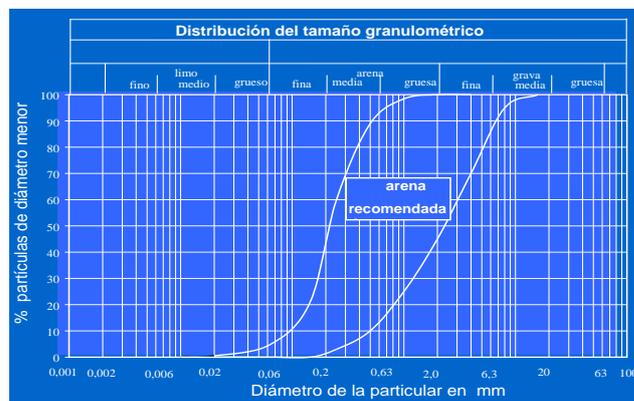


Figura 6. Recomendación para la distribución del tamaño de la partícula (Platzer, 1998)



Figura 7. Ejemplo del material utilizado en filtro del HA FSS para el tratamiento de aguas residuales de una comunidad en Brasil, arena gruesa del río sin ningún tipo de arcilla, ni limo (Fuente: C. Platzer, Rotaria do Brasil, 2008)

- La suficiencia de la conductividad hidráulica del material filtrante tiene que ser probada con la aplicación de la ley de Darcy u otro método adecuado de cálculo.
- La capa de arena para el filtro necesita un espesor de 40 a 80 cm
- Siempre es recomendado un borde libre de por lo menos unos 15 cm para la acumulación de agua, Figura 5b.
- El diseño de entrada del agua residual tiene que garantizar una distribución uniforme de tal manera que se aprovecha todo el área del humedal,
- La superficie debe ser plana y sin pendiente, de tal manera que evita la acumulación del agua en un punto o la falta de esta en otro punto Figura 5b.
- El diseño básico debe tener en consideración los sólidos totales en suspensión (SST) y la carga orgánica (DBO_5 o DQO) del fluido.
- Las plantas tienen un papel importante en los filtros, éstas tienen que estar adaptadas a las condiciones climáticas del lugar, sin embargo el proceso de purificación es principalmente una combinación de la degradación microbiana y los procesos químicos.

- Los HHAA de flujo vertical consideran que la nitrificación tiene que ser diseñada con el consumo de oxígeno y la aireación del suelo (Sección 4.2)
- Los HHAA de flujo horizontal consideran que la desnitrificación tiene que ser diseñada con la disponibilidad de una fuente de carbono

La disposición de una permeabilidad adecuada, en relación con la carga hidráulica y la carga orgánica, es el componente más crítico de los sistemas de flujo sub-superficial. La mayoría de los problemas en el tratamiento se producen cuando la permeabilidad no está adecuadamente diseñada para la cantidad de carga. Para obtener más información en relación con el diseño de HHAA FSS véase también la sección 4.

3.3 Plantas utilizadas en HHAA FSS

Los Humedales Artificiales (HHAA) de Flujo Sub-superficial (FSS) son instalados con plantas macrófitas, típicas de humedales naturales y riberas de ríos no sumergidos de la región. Las plantas de los HHAA pueden ser estéticamente agradables, reverdecer una zona edificada y también pueden presentar un hábitat para los animales, como aves o ranas. No obstante, las plantas cumplen funciones importantes para el proceso de tratamiento, ya que las plantas proporcionan el ambiente apropiado para la fijación microbiana, el crecimiento y la transferencia de oxígeno a la zona de raíz, que es parte del lecho del filtro. Por ejemplo, en el caso de la caña, que tiene una investigación amplia de las raíces y rizomas², se sabe que mantienen una alta actividad biológica en el HA (Figura 8a), debido especialmente a su gran capacidad de transporte de oxígeno entre las hojas y las raíces. La característica de las plantas que se adaptan a las condiciones de crecimiento temporalmente sumergidas de los humedales naturales, como papiro o bambú, no están investigada, pero deberían ser similares.

- El sistema de raíces mantiene la conductividad hidráulica en el sustrato de arena gruesa.
- Las plantas facilitan el crecimiento de las colonias de bacterias y otros microorganismos, que forman el biofilm adherido a la superficie de las raíces y las partículas del sustrato.
- Las plantas transportan el oxígeno a sus raíces para permitir que sobrevivan en condiciones anaeróbicas. Parte de este oxígeno transportado también está disponible para los procesos microbianos (la contribución total sigue siendo un punto de discusión)
- Para los HFV los primeros 10 cm de la capa superior es la más importantes ya que es en esta zona donde se necesita que las raíces realicen su trabajo de oxigenación en una forma uniforme, mientras que en HFH se necesita éste trabajo importante de las raíces en todo el lecho del humedal.

Para la selección de las plantas, se pueden hacer en base a los siguientes puntos:

- Es recomendable usar especies locales o nativas, y no importar especies exóticas, que pueden ser posiblemente especies invasivas.
- Las especies vegetales que crecen en los humedales naturales o a orillas de los ríos son preferibles ya que sus raíces están adaptadas a crecer en condiciones saturadas.

² 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).

- Las plantas con un sistema extenso de raíces y rizoma (Figura 8 a/b) bajo tierra son preferibles, pues deben ser capaces de soportar fuertes cargas y períodos cortos de sequía.



Figura 8 a/b. (a) raíz y sistema de rizomas del carrizo (*Phragmites australis*) (fuente: Blumberg, 2009). (b) Raíces de vetiver después de 18 meses en HFV, Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2009)

Los tipos de plantas utilizadas en humedales de FSS en climas más fríos (como en Europa, Sur de Australia y América del Norte) son (ejemplos):

- *Phragmites australis*: conocida como “caña” o “Carrizo” y en inglés como “common reed” (es la planta más utilizada en Europa y en los países de climas fríos. Figura 1 en verano y Figura 9 en invierno)
- Junco (*Typha latifolia*), en climas fríos la *Typha* es a menudo más sensible que el *Phragmites*, pero más fuerte en climas cálidos.
- *Glyceria maxima*, *Phalaris arundinacea*, lirio amarillo (*Iris pseudacorus*) y otras



Figura 9. *Phragmites australis* después de dos años en HA de flujo vertical Haran-Al-Awamied cerca de Damasco, Siria (fuente: E. v. Münch, 2009)

Los tipos de plantas utilizadas en los HHAA FSS en climas subtropical y tropical de América del Sur, África, India y Asia Oriental son:

- Papyrus: *Cyperus papyrus* o papiro egipcio (Figura 2, Figura 10) son decorativos, pero tienen los problemas que crecen hasta 3m de altura, tiende a formar una capa de materia orgánica en la superficie, y las plantas crecen solo por esquejes de la raíz de la planta madre, (Figura 11); Papiro Paraguas - *albostratus* C. y C. *alternifolius* (Figura 12a), plantas muy resistente, también son excelentes para una mayor concentración de aguas residuales o contenido de sal y Papiro Enano - *C.haspens*; excelente cuando es el único cultivo, no sobrevive a la sombra de plantas más grandes.

- Bambú, pequeña especies ornamental (Figura 12b) decorativa. Presenta problemas de crecimiento lento, especialmente en los primeros 3 años (depende del clima).



Figura 10. Papiro con 6 meses de crecimiento en un humedal de flujo vertical; Florianópolis, Brasil (fuente: C. Platzer, 2008).



Figura 11. Papiros egipcio con 12 meses de crecimiento en un HFV: la capa superficial sin raíces, desestabiliza el proceso, por que no le permite participar adecuadamente del proceso de tratamiento en el lecho del filtro (Fuente: H. Hoffmann, 2008).

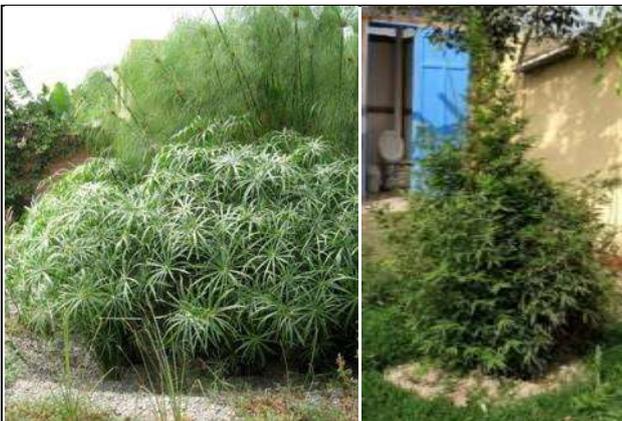


Figura 12 a/b. (a) Papiro paraguas (papiro egipcio al fondo) después de 8 meses en el HFV de aguas grises, y (b) Bambú para el tratamiento de aguas grises del lavamanos y del inodoro, Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2009).

- Junco - *Typha latifolia* (en climas tropicales son más resistentes que el *Phragmites australis*)
- Especies del género *Heliconia* - (Figure 22) son decorativas, pero hay que tener en cuenta que algunas de estas especies prefieren media sombra y otras son de condiciones de bastante luz solar.

Una planta que no es típica en humedales y se utiliza con éxito en HHAA de flujo vertical es el Vetiver - *Chrysopogon zizanioides* (*Vetiveria zizanioides*o comúnmente llamado:

gras Cuscus), puede crecer hasta 1,5 metros de altura y constituye un eficaz sistema de raíces (Figura 8b). Es utilizado en climas cálidos como control de erosión, como esencia de aceite destilado a partir de sus raíces, como planta forrajera o material de artesanía. La planta tiene una gran capacidad de adaptabilidad ecológica, pero las raíces probablemente no tienen un sistema de transporte de oxígeno como de plantas de los humedales, por lo que su utilización debería limitarse a los humedales de flujo vertical (HFV). Las raíces parecen crecer menos en el tratamiento de aguas residuales, Tal vez debido al alto contenido de nutrientes, pero el crecimiento es suficiente para mantener las funciones del HFV.

3.4 Características de las aguas residuales domésticas y de las aguas grises y las consecuencias para el tratamiento en HHAA

Los efluentes como aguas residuales domésticas, aguas residuales municipales o aguas grises, tienen características diferentes que deben ser consideradas en el dimensionamiento de la planta de tratamiento.

Las **aguas residuales domésticas** es la mezcla de todos los efluentes de la casa: baño, caños, lavandería, cocina. Una sola familia, normalmente no tiene otros efluentes, pero la composición de las **aguas residuales municipales** puede ser influenciada por ejemplo con aguas industriales o con la escorrentía de aguas pluviales. La caracterización de las aguas residuales domésticas es estándar en muchos países como parte del tratamiento de aguas residuales convencionales, la unidad habitual es la **carga per capita**. Las cantidades de DBO₅ por persona pueden variar significativamente, como se muestra en la Tabla 2, debido a las diferencias socioeconómicas. Metcalf & Eddy (2003) y Jordão y Pessoa (2005) está documentado en países como Egipto, India, Palestina, Zambia y Kenia, las cargas de DBO₅ están alrededor de 30 g / persona.día.

El volumen y la concentración de las aguas residuales resulta del consumo de agua potable (tabla 2), que pueden tener grandes variaciones entre países, regiones y clases sociales. La capital peruana, Lima, por ejemplo, está situado en un desierto, pero los hogares ricos utilizan hasta 400L de agua potable / persona.día mientras que en los asentamientos humanos sin suministro de agua sólo se utiliza 20 l / persona.día, que es la mínima cantidad para asegurar la supervivencia (OMS, 2003).

Tabla 2. Valores típicos de los factores de carga en las aguas residuales crudas

Carga g/persona.d	Peru ¹	Brazil ²	Alemania ³	EEUU ⁴
DBO ₅ (g)	50	54	60	85
DQO (g)			120	198
SST (g)	90	90	70	95
NTK (g)	12	10	11	13
total P (g)	3		1,8	3
Aceite y grasa		15 ⁵		31
Agua potable/ pe. d (l)	150-250	100-300 ⁵	100-150 ⁵	190-460

¹Norma de Saneamiento S.090 (1997); ²Jordão & Pessoa (2005), ³ATV-DWKV A131 (2000), ⁴Metcalf & Eddy (2003); ⁵Basado en los valores de las concentraciones de las Fuentes nacionales

En contraste con la situación de Lima, el reducido consumo de agua en Alemania (Tabla 2) es el resultado del uso consciente del agua potable debido al alto precio del agua. El bajo consumo de agua tiene como resultado aguas residuales altamente concentradas, sin embargo la carga per cápita es la misma.

La caracterización de las aguas residuales domésticas no está completa sin la relación de presencia potencial de microorganismos y patógenos, que son excretados por humanos y animales que están infectados o son portadoras de una enfermedad, este aspecto se examina por separado en la sección 3.6.

El **agua gris** se define como agua residual doméstica sin la descarga de sanitarios, es por eso que normalmente se encuentra libre de materia fecal y orina, o sólo contiene indicios de éstos. Por lo tanto, esta es agua residual procedente de duchas, bañeras, lavaderos de mano, lavandería, limpieza de pisos, fregaderos de cocina y similares. En comparación con aguas residuales domésticas, las aguas grises tienen cargas significativamente más bajas per cápita de materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y patógenos, pero no existen normas de estas.

Un análisis detallado de aguas grises fue publicado por Ridderstolpe (2004) enfocado desde las condiciones de Suecia. Carden et al. (2007), Mungai (2008) y Raude et al. (2009) publicaron datos, para los países en desarrollo, sobre las aguas grises en Sudáfrica y Kenya, respectivamente. Los datos de las características de las aguas grises son muy variadas, también se debe considerar que el tratamiento y reutilización de las aguas grises como parte del concepto ECOSAN es un área relativamente nueva. El tratamiento de aguas grises es considerado a menudo como una forma simple de tratamiento de aguas residuales, pero existe una carencia de experiencias y finalmente casi todas las tecnologías de tratamiento más conocidas son derivadas del tratamiento convencional, no son desarrolladas para el tratamiento de aguas grises específicamente.

El volumen de las aguas grises, también depende del nivel de prosperidad de la familia (como una regla de oro: el más rico del pueblo, más aguas grises produce). En los países sin conexión de agua las aguas grises de la casa pueden ser más concentradas que las aguas residuales de las regiones más favorecidas, debido al menor consumo de agua y a las prácticas de reutilización existentes (el agua es utilizada por primera vez para la higiene personal, y luego para lavar la ropa y luego para lavar el piso o dados de baja por los retretes).

Para hogares con inodoros, la producción de aguas grises, es igual al flujo de agua residual total menos la cantidad utilizada en los sanitarios. El agua de los sanitarios se llama aguas negras, el volumen depende del uso del baño y el sistema de descarga, normalmente, el volumen varía entre 40 y 60 L / día.pe. Para los hogares con baños secos (tales como letrinas, UDDTs o inodoros de compostaje)³, la producción de aguas grises, es igual a la producción total de aguas residuales.

Las aguas grises son una mezcla de efluentes muy diferente, incluso proyectos de descentralización de ECOSAN pueden enfocarse en la reutilización de aguas grises de hoteles, restaurantes, escuelas o lavanderías, lo que significa que el volumen tiene que ser medido o calculado por separado. Las

siguientes experiencias no publicadas surgieron de los proyectos ECOSAN de Hoffmann en América del Sur:

- Lavado de manos en baño público: 0,5 - 1 L
- 5 minutos de ducha: 40 L
- Preparación de una comida en el restaurante: 10 - 25 L

El uso específico de agua depende de la región, también es diferente la composición de los efluentes y, a veces no son predecibles:

Las **aguas grises de ducha o de lavandería**, principalmente contienen detergentes, la degradabilidad depende del producto y siempre es recomendable utilizar detergentes biodegradables. Las fibras textiles del lavado de ropa y los cabellos de las duchas a menudo son mal retenidas en el pre-tratamiento y pueden causar problemas en los equipos de tratamiento técnico (bombas, válvulas). Las experiencias a veces también muestran hábitos inesperados como el orinar en la ducha, que puede conducir a problemas de olor cuando sólo son tratados los efluentes de la ducha (hoteles, albergues, centros deportivos o campings), o cuando el efluente se almacena antes del tratamiento. (H. HOFFMANN, no publicado)

Las **aguas grises de cocina, panadería y restaurantes** pueden tener carga orgánica muy elevada provenientes de restos de comidas, aceite y grasas que pueden resultar en una alta concentración orgánica (> 500 mg DBO₅/ L). En este caso el tratamiento anaeróbico primario (con el uso de biogás) puede ser un pre-tratamiento alternativo económico, especialmente en climas cálidos. Las aguas grises de los lavaderos de la cocina también pueden tener una gran cantidad de arena (lavado de vegetales), una trampa de grasa común como pre tratamiento no está diseñada para la sedimentación de arena.

Además, el uso de cenizas para lavar los platos puede causar problemas con la obstrucción del suelo en el humedal, en especial cuando el efluente se mezcla con el jabón de lavar ropa, ya que las cenizas forman con el jabón un coagulante que puede pasar la trampa de grasa, pero permanece en la superficie del humedal. (Hoffmann, no publicado)

Las aguas grises no están libres de patógenos, ya que éstos pueden entrar por las siguientes vías:

1. Lavado de la zona anal en la ducha;
2. Lavado de los pañales de algodón de los niños o ropa interior;
3. Re-afloramiento de las bacterias en el depósito de recolección de aguas grises

Como las aguas grises no contienen heces, normalmente son consideradas como inofensiva, sin embargo, en algunos casos, se han encontrado en aguas grises un número elevado de **bacterias indicadoras**.

Como Ridderstolpe (2004) explica: "*Recientes investigaciones han demostrado que el crecimiento de bacterias entéricas como indicadoras fecales se ven favorecidas en aguas grises debido a su alto contenido de compuestos orgánicos fácilmente degradables. Por eso, un enfoque de los números indicadores bacterianos lleva a una sobrestimación de las cargas de materia fecal y, por lo tanto, del riesgo higiénico. Además, el hecho de que las aguas grises se conviertan con facilidad en anaeróbica y cree así malos olores, puede haber llevado a la conclusión errónea de que las aguas grises son un peligro para la salud.*

En los últimos años, otros métodos han sido desarrollados para evaluar la calidad higiénica del agua. Mediante la medición de biomarcadores químicos en el agua residual, como

³ Para más detalles sobre UDDTs (urine diversion dehydration toilets) o baños composteros, ver en las tecnologías de GTZ, revisar estos tipo de baños en : <http://www.gtz.de/en/themen/umwelt-infrastruktur/wasser/9397.htm>

los esteroides fecales, que dan un valor más apropiados de la contaminación fecal.

La investigación de un sistema de tratamiento local en Vibyåsen, al norte de Estocolmo, llegó a la conclusión que las mediciones convencionales donde se utilizan las bacterias tradicionales indicadores sobrestiman la carga fecal de 100 a 1000 veces en comparación con las mediciones a través de biomarcadores químicos. La medida basada en coprostanol, la contaminación fecal de las aguas grises en Vibyåsen se estima en 0,04 gramos por persona al día (Ottosson, 2003).

Dado que en las aguas residuales mixtas la carga fecal normal de las casas son de unos 150 gramos por persona al día, las aguas servidas tratadas en Vibyåsen representa sólo una fracción del riesgo normal de las aguas residuales".

Las principales diferencias entre el diseño de HHAA para el tratamiento de aguas residuales convencionales y el tratamiento de aguas grises incluyen:

- La eliminación de nitrógeno y fósforo no es importante para el tratamiento de aguas grises (pues la concentración de nutrientes es mucho más baja en las aguas grises que en las aguas residuales domésticas).
- La eliminación de patógenos no es un gran problema en el tratamiento de aguas grises (ya que por lo general hay bajos niveles de patógenos).
- Las aguas grises a menudo tiene una menor carga específica de DBO_5 que las aguas residuales domésticas (g DBO_5 / persona.d).

Para el dimensionamiento de los humedales lo más importante a tener en cuenta es la DBO_5 y la carga SST, ambos son reducidos en el pre-tratamiento.

3.5 Tratamiento primario de aguas residuales domésticas y aguas grises antes de entrar al HA FSS

El HA FSS se hace referencia como el paso de "tratamiento secundario", lo que significa: que los sólidos suspendidos (SS) y las partículas más grandes (incluyendo el papel higiénico y otras basuras), así como algunos de materia orgánica (MO) deben ser removidas antes que las aguas residuales puedan ser tratadas en los HHAA de flujo horizontal o vertical. La tecnología utilizada depende del tipo de agua residual:

- Aguas grises.- Pre-tratamiento: rejas, cámara de sedimentación de arena o la trampa de grasa
- Aguas residuales domésticas (y aguas grises con alta carga orgánica).- Tratamiento primario en tanques sépticos, tanques de sedimentación, tanques Imhoff o tratamiento anaeróbico.

El pre-tratamiento es sumamente importante para evitar la obstrucción del HA de flujo sub-superficial (obstrucción de los poros debido a la acumulación de sólidos). El problema de la obstrucción del suelo ha sido estudiado por diversos autores, véase la sección 4.

Trampa de grasa (Interceptores de grasas)

Grasas, aceites y mantecas (GAM) son retenidas por medio del proceso de flotación en una cámara posterior al caño de la cocina, donde no pasan otros efluentes. A la salida del fregadero y / o a la entrada de la trampa debe estar equipada con un filtro extraíble que retenga sólo los restos de alimentos (y tal vez la arena). La capa de grasa flotante, la nata (Figura 13 a/b Diseño de trampa de grasa (a) y trampa de grasa en uso (b) para el efluente de un caño de cocina de una casa en Lima / Perú antes del tratamiento en el humedal, (fuente: H. Hoffmann, 2010)

a/b), tiene que ser eliminada periódicamente (el tiempo depende de la cantidad de grasa utilizada en la cocina), antes de que se hunda en el suelo. Para los hogares a menudo existen trampas comerciales con cubos de plástico extraíble, que simplifica la limpieza. Amplias trampas de grasa deben limpiarse con bomba.

- Los tratamientos primarios comunes de aguas residuales domésticas y municipales (por ejemplo: pozos sépticos) también eliminan parte de las GAM, pero para restaurantes y grandes cocinas es importante contar por lo menos con una trampa de grasa ya que las altas grasas concentradas pueden causar problemas en el pre-tratamiento, así como en el alcantarillado (bloqueo de poros).
- Cuando la trampa de grasa es el único pre-tratamiento de aguas grises en un HA, puede ser necesaria la combinación con un tanque de sedimentación (o tener una salida en la parte inferior de la trampa) para extraer los sedimentos de lodo que pueden ser formados por arena, jabones y restos de alimentos, que podrían pasar a los humedales.

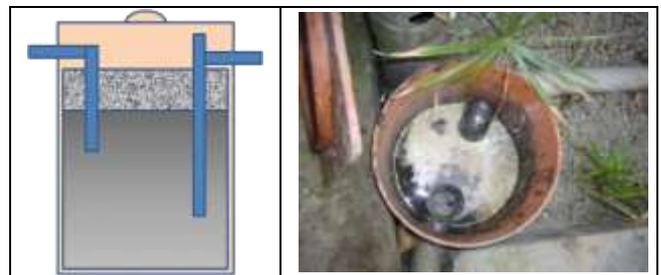


Figura 13 a/b Diseño de trampa de grasa (a) y trampa de grasa en uso (b) para el efluente de un caño de cocina de una casa en Lima / Perú antes del tratamiento en el humedal, (fuente: H. Hoffmann, 2010)

La nata tiene que ser retirada para ser tratada, por ejemplo, en un compost o en una planta de tratamiento centralizadas. El valor energético elevado de estas grasas y aceites también pueden ser utilizadas para la digestión anaeróbica (biogás) o para la producción de biodiesel (http://www.treehugger.com/files/2006/07/biodiesel_from.php).

Tanque Séptico (TS)

El tanque séptico es el componente más utilizado en los lugares con instalaciones sanitarias para el tratamiento descentralizado de las aguas residuales domésticas debido a su simple construcción. Se puede utilizar para el pre-tratamiento de las aguas residuales desde 5 hasta 500 habitantes. El TS se compone de dos a tres cámaras (ver Figura 14 a/b: Diseño del tanque séptico (a) y en construcción para una casa con 15 habitantes (b) en Lima (fuente: Hoffmann, 2009)

), con una profundidad de 1,4 m (o más) desde el punto de la tubería de entrada.

En un sistema con tres cámaras, la primera está diseñada con el 50% del volumen total y está conectada con la segunda cámara entre los 60-80 cm del suelo, para permitir que los sólidos sedimenten y la nata superficial se mantenga en la primera cámara. La tercera cámara es utilizada como el reservorio, puede ser equipado con una bomba para enviar el agua hacia el siguiente paso del tratamiento.

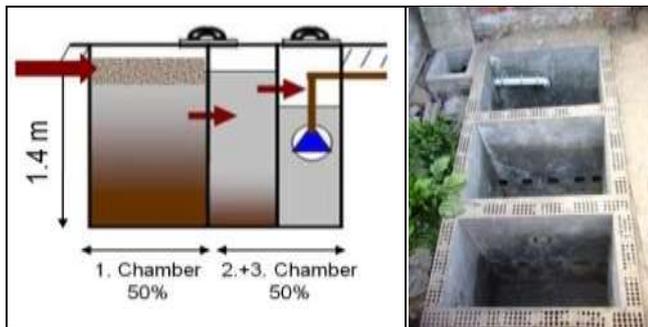


Figura 14 a/b: Diseño del tanque séptico (a) y en construcción para una casa con 15 habitantes (b) en Lima (fuente: Hoffmann, 2009)

Muchos países tienen normas para la construcción del TS, también existen tanques prefabricados en fibrocemento o de plástico. En climas subtropical el diseño del TS son con un tiempo de retención de 1-2 días, en clima frío son diseñados hasta con 5 días. El proceso de tratamiento se basa en la sedimentación con una degradación parcialmente anaeróbica de los lodos, que tiene como resultado una reducción del 30% de la carga orgánica (DBO_5) en el efluente. Esto también significa que el biogás (metano) es liberado, que tiene un efecto negativo en el clima mundial (ya que el biogás normalmente no es quemado).

Dependiendo del llenado de la primera cámara, los lodos almacenados tienen que ser eliminados una vez en 1-3 años. Ni el efluente ni los lodos pueden ser reutilizados sin ningún tratamiento adicional (secundario).

Filtro de Compost FC

El FC es una alternativa interesante al tanque séptico. Se trata de un pre-tratamiento muy eficaz cuando hay una gran preocupación por la producción de gas no controlado. Como se trata de un pre-tratamiento aeróbico, cobra relevancia como parte de los proyectos ECOSAN de pre-tratamiento de aguas negras concentrada (sólo la de descarga de retretes, sin aguas grises de ducha, lavabo o la ropa). Hasta ahora sólo se utiliza para los hogares individuales o de hasta el 70 PE (Gajurel et al., 2003, Hoffmann et al., 2008)

Las aguas negras crudas pasan por una cesta de filtro (material plástico) a una cámara de ventilación (con tubo de ventilación). El material fresco se conserva en la cesta del filtro y tiene que ser cubierto con frecuencia (por lo menos una vez a la semana) con paja seca de los cereales (trigo o el arroz) ("Rottebehälter" - ver Figura 15)

A diferencia del tanque séptico (sedimentación de sólidos) el efluente es pasado a través de un Filtro de Compostaje, donde se retiene el material sólido. El efluente es recolectado en la parte inferior y, normalmente, es bombeado al tratamiento secundario, por la pérdida hidráulica en los filtros de compost que es de aproximadamente 1,5 m.

Los sólidos son acumulados en las cestas del filtro, las que son utilizadas en juegos de 2 a 4 cestas utilizadas en alternancia y dispuestas en cámaras separadas. Los sólidos retenidos son mayormente llevados a compostaje por un periodo de reposo de 6 meses, esto cuando son usadas más de una cesta. En este tiempo la reducción del volumen puede alcanzar el 75%, el producto es de color negro compuesto compacto, y sin embargo, un segundo abono siempre es recomendable (especialmente debido a los huevos de helminths, véase la sección 3.6).



Figura 15a/b: Filtro de Compost en Lima, Perú, (a) sistema con doble cámara ventilada, (b) cesta en la etapa de llenado (fuentes H. Hoffmann, 2008)

El FC se basa en un proceso aeróbico que no produce biogás o efluentes con mal olor y es económico, ya que no produce lodos. Por otra parte, requiere de mayor mantenimiento, su utilización se limita a pequeñas unidades y sólo funciona con aguas negras de alta concentración, pues muy diluidas pueden lavar los sólidos del filtro.

Tanque Imhoff (TI)

El tanque Imhoff es un sistema séptico de dos etapas, donde el lodo es digerido en un compartimiento separado y no se mezcla con las aguas residuales que entran. Este sistema es recomendable para climas fríos (regla de oro, por encima de 2000 msnm la temperatura de las aguas residuales es inferior a 15 °C). Es un sistema compacto y eficiente para el tratamiento primario de aguas residuales municipales de 200 a 5,000 habitantes. Reduce entre 30%-40% la materia orgánica de las aguas residuales crudas. El lodo es anaeróbicamente estabilizado y puede ser utilizado en la agricultura (aunque hay que tener cuidado con los huevos de helmintos, véase la sección 3,6). La división en tres compartimentos (Figura 16a/b) permitirá almacenar y quemar el biogás:

1. Compartimiento superior para la sedimentación
2. Sección inferior para la digestión del lodo
3. Sección de nata y ventilación de gases.

La producción de biogás es más crítica que en los tanques sépticos, pero desafortunadamente las aguas residuales comunales a menudo no son lo suficientemente concentradas como para remunerar el uso de biogás.

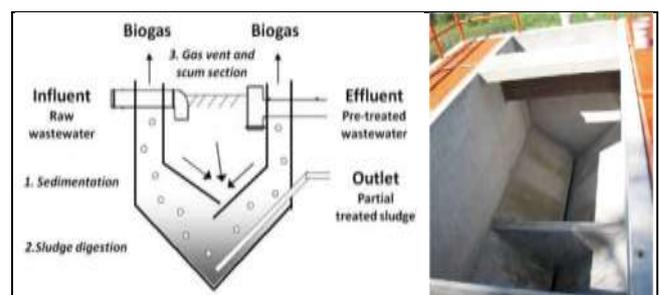


Figura 16 a/b: diseño del tanque Imhoff (a) y construcción (b) en una zona rural del Perú (fuente: H. Hoffmann, 2008)

El lodo debe de ser retirado periódicamente con la ayuda de un tubo y puede ser secado como abono orgánico; el efluente está bien preparado para un tratamiento secundario en HHA FSS por ejemplo.

Tanque Baffled (TB)

TB es un Tanque Séptico mejorado o un UASB simplificado, utilizado por ejemplo BORDA (para el tratamiento primario de aguas residuales en comunidades de 200 a 2,500 habitantes). El BT tiene de 4 a 6 compartimentos en lugar de 2 o 3,

el tiempo de retención total es superior al de un tanque séptico. La carga orgánica del efluente es reducida aproximadamente entre un 40% (en invierno, clima más frío) y un 60% (en clima más cálido), en consecuencia, la producción de biogás es más alto que en los tanques sépticos y el biogás debe ser quemado (raramente se hace). Los lodos son estabilizados anaeróbicamente y puede ser utilizado en la agricultura.

Es recomendable elegir el BT cuando sea posible debido a la construcción relativamente simple, pero con una mayor eficiencia que las fosas sépticas. Cuanto más eficiente sea el tratamiento primario, más económico será el tratamiento secundario. Esto significa que un humedal artificial con el efluente proveniente de un tanque Baffled tendrá sólo el 60% de la superficie que ocuparía normalmente, cuando los mismos efluentes son pre-tratados en una fosa séptica y en un tanque Baffles, probablemente, la operación del efluente de este último sea más estable, debido a una aclaración más eficiente por la retención de los lodos.

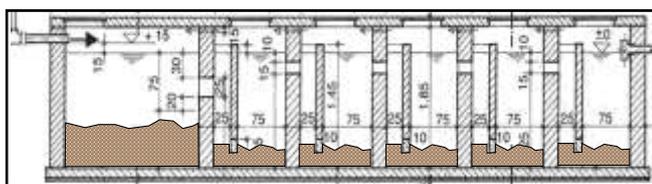


Figure 17: Diseño del tanque Baffled
Fuente: BORDA <http://www.borda.de/pdfs/DEWATS.pdf>

Reactor UASB

Del inglés *Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactor*, el reactor UASB es una tecnología especial para el tratamiento anaerobio de aguas residuales desarrollada por Lettinga (v. Haandel & Lettinga, 1995). Es usado frecuentemente (con variaciones) en climas cálidos para el tratamiento de aguas residuales municipales, también para lodos y efluentes industriales con alta carga orgánica (panadería, fábrica de cerveza). Hay muchas aplicaciones en el Brasil para las aguas residuales municipales, el uso se recomienda en clima subtropical para alturas inferiores a 2000 msnm (regla general).

El afluente entra por la parte inferior del UASB (Figure 17a/b) y debido a la alta carga de bacterias anaerobias del lodo en el reactor se forman gránulos que filtran las aguas residuales biológica y mecánicamente. La salida del efluente ya clarificado y el biogás captado es por la parte superior del reactor.

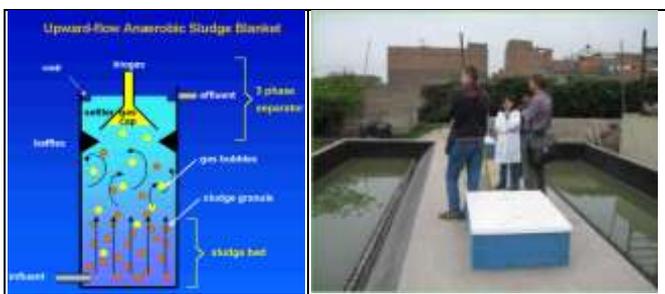


Figure 18 a/b: Diseño del reactor UASB (a) (Fuente: <http://www.uasb.org/discover/uasb-scheme.gif>) y (b) UASB para 5.000 PE., Lima, Universidad Nacional de Ingeniería, área de salida y captación del gas (en realidad, el gas no es utilizado, fuente: H. Hoffmann 2007)

El Reactor UASB es una tecnología compacta que logra una reducción del 80% de DBO₅, tiene una baja producción de lodos y el total de biogás captado puede ser utilizado(o incinerado, aunque a menudo no se hace).

Para el tratamiento secundario en HA es importante que la pérdida de los lodos procedentes de UASB sea evitado. Por lo tanto, el dimensionamiento adecuado de la decantación es muy importante. La alta eficiencia del pre-tratamiento permite dimensiones menores de los humedales.

3.6 Aspectos del reuso

Los HHAA FSS tratan las aguas residuales a un estándar apropiado para ser vertidas en otras fuentes de aguas superficiales o aptas para la reutilización en diversas aplicaciones según recomendaciones de la OMS (OMS, 2006). El diseño del HA FSS depende de la calidad del efluente deseado (para su disposición o reutilización). Las aguas grises (ver 3.4) que cumplen con mayor facilidad la calidad estándar de las normas no precisa de un tratamiento adicional. Pero, para el caso de las aguas residuales domésticas es necesario hacer un análisis de los efluentes, por razones de seguridad es necesario desinfectar (tratamiento terciario).



Figura 19 a/b (a) Agua gris pre-tratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de cultivos, (b) Agua negra pre-tratada y efluente después del HFV, para ser reutilizado en el riego de áreas verdes, las aguas residuales con coloración marrón son típicas y es causado por las huminas (fuentes: H. Hoffmann, 2008)

El tipo de reutilización más común es para riego (riego por goteo o riego subterráneo), de jardines, espacios verdes o producción de cultivos, y a veces también para la descarga en el inodoro. Deben ser seguidos los criterios pertinentes para garantizar una práctica higiénica e inocua para el cliente, así como para los trabajadores que pueden estar en contacto directo. Las normas internacionales para la reutilización del agua tratada pueden encontrarse en la OMS (2006). Los requisitos legales para la calidad de los efluentes varían en función de los reglamentos específicos de cada país y en la reutilización prevista o vía de eliminación. Además, hay algunos aspectos de la reutilización, que son comunes para los residuos y la reutilización de aguas grises.

- **Aspectos del volumen:** para el mismo número de personas los HHAA del tratamiento de aguas grises son siempre más pequeños que los de aguas residuales domésticas, y lechos de flujo vertical son siempre menores que lechos de flujo horizontal. Cuanto mayor sea la superficie del humedal, mayor será el efecto de las precipitaciones y la evapotranspiración, especialmente en climas cálidos y secos. Lechos de flujo horizontal en clima caliente pueden "perder" toda el agua debido a la evapotranspiración. Esto debe tenerse en cuenta en el balance hídrico.
- **Aspectos de la coloración** de residuos y aguas grises, que son tratados con procesos biológicos (no sólo en HHAA) pueden presentar un color amarillo o marrón, que en su mayoría es causada por la presencia de sustancias húmicas (ácidos húmicos) (Figura 19b). Las sustancias

húmicas provienen de la transformación biológica de la materia orgánica y las células bacterianas muerta. Estas no son tóxicos pero tienen un impacto negativo en los procesos de desinfección y presentan la fracción más estable de la materia orgánica de los suelos y el agua. Cuando las aguas residuales tratadas se utilizan en el inodoro, por ejemplo, es más fácil usar sanitarios en porcelana de colores, que hacer un tratamiento de coloración, pues las sustancias húmicas sólo pueden ser removidas por tecnologías avanzadas, conocidas para el tratamiento de agua potable (carbón activado, Ozono, oxidación fotocatalítica) (Guylas et al., 2007; Abegglen et al., 2009)

- Los **Aspectos de higiene** para la reutilización están principalmente vinculados a las aguas residuales domésticas. La reutilización de aguas grises puras (sección 3.3) se tratarán en HHAA FSS, que puede ser limitado (en el peor de los casos) por la presencia de detergentes no biodegradables o problemas de coloración por las sustancias húmicas, pero normalmente no por patógenos. No obstante: **¡En HHAA las aguas residuales tratadas o aguas grises NUNCA serán agua potable!**

El tracto intestinal humano contiene grandes cantidades de bacterias coliformes, que son descargadas con las heces e indican en muestras ambientales, que los agentes patógenos intestinales también pueden estar presentes. Microorganismos patógenos que se transmiten por aguas residuales o agua contaminada (enfermedades transmitidas por el agua) son por ejemplo (OMS, 2006):

- Bacterias: *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Vibrio cholera*, *Shigella*, *Legionella*, *Leptospira*, *Yersinia*.
- Protozoos: *Entamoeba*, *Giardia* y *Cryptosporidium*.
- Helmintos: (gusanos intestinales) *Ascaris*, *Enterobios*, *Taenia*, *Schistosoma*, *Trichuris*, *Fasciola*.
- Virus: *Adeno-*, *Entero-*, *Hepatitis A-*, *Polio-*, *Rota-*, *Virus Norwalk*.⁴

Las enfermedades típicas son diarreas inespecíficas con cólicos y vómitos, náuseas, deshidratación o fiebre tifoidea, cólera, poliomielitis o también enfermedades respiratorias (adenovirus).

Todos estos patógenos pueden ser excretados por personas (o animales) que están infectados o son portadores de una enfermedad; sus concentraciones típicas de aguas residuales sin tratar se muestran en la Tabla 3

Tabla 3. Concentración de microorganismos en aguas residuales

Concentración N ^o /100ml	Brasil	USA	OMS
Coliformes Termotolerantes	10 ⁶ -10 ¹⁰	10 ⁶ -10 ⁸	10⁸-10¹⁰
Huevos de Helmintos	10 ¹ -10 ³	10 ¹ -10 ³	10¹-10³
Quistes de Giardia	10 ² -10 ⁴	10 ³ -10 ⁴	10²-10⁵
Quistes de Cryptosporidium	10 ¹ -10 ²	10 ¹ -10 ³	10¹-10⁴

Bacterias: La mayoría de las bacterias coliformes termotolerantes no son patógenas, pero la probabilidad de que bacterias patógenas sean transmitidas sólo puede ser minimizadas mediante la reducción total de la concentración de bacterias. Es importante mencionar, que las bacterias sobreviven en clima caliente por mucho tiempo (OMS, 2006), lo cual lleva a esperar mayores problemas de enfermedades trans-

mitidas por agua en resultado al cambio climático en todas las regiones donde las aguas residuales no son tratadas.

En cada etapa del tratamiento se eliminan bacterias y otros microorganismos, en general los sistemas de alta carga eliminan menos que los sistemas de baja carga con grandes tiempos de retención (tabla 4). Experiencias en Europa mostraron que los HHAA FSS, incluso los de flujo vertical y con eficiente pre-tratamiento (tanque séptico o tanque Imhoff) producen efluentes con alrededor de 10⁴ bacterias de coliformes fecales (Hagendorf, 2000). El efecto de filtración depende del tiempo de retención (normalmente HFH son más eficientes que HFV) y del material de filtrante (arena siempre es más eficiente que grava).

Tabla 4. Registro de las unidades de Reducción de los agentes patógenos excretados por los procesos de tratamiento seleccionado (de la OMS Parte 2)

Tratamiento	Bacteria	Helmintos	Protozoos	Virus
Laguna de estabilización	1-6	1-3	1-4	1-4
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

Otras consideraciones objetivas para la reutilización (según la OMS, 2003) es la necesidad de una desinfección final del tratamiento del efluente (terciario) por:

- Cloro (y compuestos de cloro), la oxidación de toda la materia orgánica, tóxicos para las bacterias y también para todos los demás organismos
- Radiación UV, daño fotoquímica de las bacterias, aumenta los costos, pero sin dañar el medio ambiente y sin riesgo para la salud

El tratamiento terciario es sólo económico, cuando los efluentes son transparentes y no contienen compuestos orgánicos (DQO no degradadas o sustancias húmicas, compuestos aromáticos), que consumen el cloro o absorben la radiación UV sin efecto de desinfección (Metcalf & Eddy 2003), además el cloro es utilizado para producir compuestos clororgánicos, que son ecotóxicos y cancerígenos.

Helmintos: La expansión de helmintos en el mundo se correlacionan claramente con la cobertura de saneamiento, poblaciones de países en desarrollo pueden tener altas tasas de contaminación. Los helmintos son transmitidos por huevos, los cuales son resistentes a la desinfección con cloro, pero son relativamente grandes (10-100µm) (Metcalf & Eddy, 2003), la sedimentación intensiva con tecnologías de filtración como el tratamiento primario combinado con la filtración en HHAA muestran las mejores tasas de eliminación (tab. 4).

El problema de las lagunas de estabilización de residuos y otras formas de sedimentación (por ejemplo, como pre-tratamiento) es que los huevos permanecen en el lodo, donde pueden sobrevivir por más de 10 años (Metcalf & Eddy, 2003). Los huevos deben ser desactivados antes de que los lodos procedentes de estanques de estabilización de residuos o del tratamiento primario sean utilizados en la agricultura. Sin embargo, los huevos de helmintos no son afectados por cal, o por la digestión mesófilica, o por Vermicomposting (compost de lodos o materia fecal con lombrices de tierra). El

⁴ No hay evidencia de que el VIH, el virus que causa el SIDA, sea transmitido por aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2003)

tratamiento de lodos más recomendable es del calor del compostaje (3 días 70 ° C, OMS, 2006) o el secado (>30%)⁵.

Protozoos y virus: protozoos como Giardia y Cryptosporidium tienen un impacto significativo sobre las personas que tienen el sistema inmunológico comprometido. La infección es causada por la ingestión de agua contaminada y los quistes y oocistos son liberados con las heces y muy común en las aguas residuales. La velocidad de eliminación de estas pequeñas partículas (3-14 µm) es la misma que la del virus (cuadro 4); un buen pre-tratamiento con tiempo de retención extendido en HAA FSS con arena gruesa puede ser la mejor garantía para una eliminación efectiva. Los quistes no son inactivados por la desinfección convencional con el uso del cloro, mientras que una desinfección con UV parece ser más eficaz (Metcalf & Eddy, 2003). Los virus son inactivados por el cloro, mientras que la radiación UV también parece ser más eficiente (Metcalf & Eddy, 2003).

4 Diseño de Humedales Artificiales de flujo sub-superficial (HAA FSS)

Observación: el enfoque es el diseño y aplicación de lechos de flujo horizontal (FH) y flujo vertical (FV), ambos Humedales Artificiales de flujo sub-superficial (HAA FSS). El lecho filtrante se basa siempre en arena gruesa, raíces de las plantas y que el agua no se acumule en el área superficial.

4.1 Lecho de Flujo Horizontal (FH)

El mayor desarrollo de los HAA FSS se basó en la aplicación de humedales de FH, los cuales siguen siendo las plantas de tratamiento más aplicadas. Al comienzo los humedales de FH mostraron algunos problemas con la superficie de escorrentía y por lo tanto también con resultados de depuración pobre, pero hoy en día el HFH bien diseñado es ampliamente aceptado como un gran sistema de tratamiento, y de bajo costo de mantenimiento, para el tratamiento secundario de aguas residuales. Especialmente en lugares sin energía y bajas gradientes hidráulicas, los HFH son recomendables para los propósitos de tratamiento secundario.

Los sistemas de flujo horizontal son llamados así por la manera en que el agua residual fluye lentamente a través del medio poroso por debajo de la superficie del lecho desde la entrada en una forma más o menos horizontal hasta llegar a la zona de salida (Figura 20). Aquí, el agua es colectada y el nivel de salida es controlado (Figura 21). Para la operación continua del sistema, el nivel de agua debe ser inferior a 1 / 3 de la altura total del lecho del filtro para evitar condiciones anaeróbicas.

Las aguas residuales se purifican al entrar en contacto con la superficie de las partículas del suelo y las raíces de las plantas (ver 3.1), el suministro de oxígeno desempeña un papel importante para la eficiencia del proceso de tratamiento. En comparación con el flujo vertical (FV, 4.2) el flujo horizontal no permite una introducción adicional de oxígeno, esta es una razón de la necesidad de mayor superficie del HFH. La segunda razón es el área más pequeña de entrada (compárese con la Figura 21 de la HFH con la Figura 25 con el HFV), el área de entrada se compone sólo del ancho del lecho, multiplicada por la profundidad, mientras que en el HFV toda la superficie se utiliza como área de entrada. Por eso HFH tienen la necesidad de mayor área y también un limitado potencial de reducción de la superficie en climas cálidos en comparación con el HFV.

Recomendaciones básicas del diseño de un HFH:

- Mientras que la superficie superior del filtro se mantiene horizontal para evitar la erosión, el fondo tiene una pendiente preferentemente entre 0,5-1% desde la entrada a la salida para permitir un fácil drenaje (Morel y Diener, 2006).
- La profundidad del lecho de un HFH normalmente es de unos 60 cm, (adicionalmente tiene unos 15 cm de borde libre para la acumulación del agua).
- **El área superficial específica para un HFH es de 3 a 10 m² /pe.** En el caso de un HFV el tamaño depende de la temperatura, en climas más cálidos el área es minimizada debido a la mayor actividad biológica durante todo el año. En zonas con un fuerte invierno el diseño mínimo no debe ser inferior a 5 m² / pe (como en Alemania por ejemplo, sólo para dar una orientación)
- La carga orgánica en un HFH en climas fríos varía de **4-10 g DBO₅ / m².día** (Wood, 1995; Morel y Diener, 2006) o 16 g de DQO / m².día (DWA 2006). Hay una falta de experiencias garantizadas en climas cálidos (para HFH con material de arena gruesa).⁶ La carga orgánica (si es conocida) básicamente puede ser aplicada para aguas grises y de aguas residuales
- La máxima carga hidráulica para un HFH puede ser de hasta 60-80 mm/d (Wood, 1995; Ridderstolpe, 2004; Morel y Diener, 2006), para aguas residuales se recomienda una carga <40 mm/d (DWA, 2006), pero el factor limitante es la carga orgánica, lo que significa que la baja carga de aguas grises (de ducha o la ropa) probablemente puedan ser descargadas con mayor carga hidráulica.

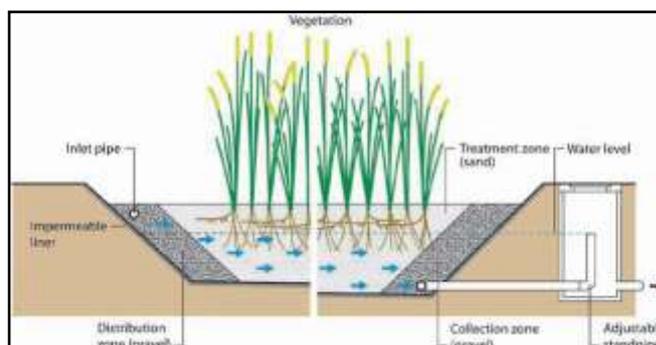


Figura 20. Esquema de la sección transversal del humedal de flujo horizontal (HFH), HAA FSS (fuente: Morel y Diener, 2006).

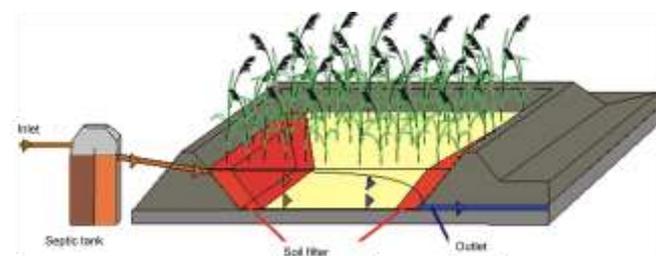


Figura 21. Esquema de la sección transversal del flujo horizontal FH-HAA FSS con pre-tratamiento (fuente: <http://www.bodenfilter.de/engdef.htm>)

⁵ El UDDT que esta libre de agua basa su tecnología también en el proceso de secado

⁶ Por favor, no dude en escribir a la dirección indicada si usted tiene algun resultado.

Los HFH son más simples que los HFV, sin embargo estos pueden fallar por errores de diseño. El punto más crítico para un diseño adecuado es la zona de entrada, la que actúa como filtro y remueve una porción significativa de sólidos suspendidos. Se necesita una especial atención para prevenir la colmatación⁷ y la escorrentía superficial:

- La mejor recomendación para evitar problemas de infiltración es controlar la eficiencia del pre tratamiento.
- La zona de entrada puede ser llenada con pequeñas piedras o grava gruesa, que garantizan, junto con los tubos de alimentación (Figure 22) que las aguas residuales se distribuyan por igual en toda la anchura y profundidad del lecho.
- Otra posibilidad es construir una pequeña presa después de los 2 m iniciales del lecho (Figura 23a). Esta parte de la superficie del HFH serviría como una zona de entrada.
- Es absolutamente necesario llevar a cabo un dimensionamiento hidráulico por la Ley de Darcy para garantizar una gradiente hidráulica suficiente para el lecho del filtro.



Figure 22. Humedal de flujo horizontal (HFH) para el tratamiento de aguas grises en Lima/Perú, área de entrada con grava y tubos de distribución (fuente: R. Miglio, 2009).

Los números y los comentarios generales siguientes dan una idea acerca de las figuras típicas de dimensionamiento en HFH con un material de filtro de arena gruesa:

- La obstrucción en HFH se produce principalmente en aquellos que tienen la zona de entrada limitada y un filtro bastante largo, la geometría adecuada para grandes HFH se muestra en la Figura 23b.
- El uso eficiente de la zona del filtro (Figura 23a) es dada sólo por la longitud del filtro (desde la entrada hasta la salida Figura 23b), de aproximadamente 5-8 m (DWA, 2006)
- Longitud de entrada con más de 15 m no son comunes en Alemania, otras líneas de diseños utilizan longitudes de hasta 25 m, sin duda un ancho de lecho (o longitud de entrada) mayor a 30 m es crítico para la distribución uniforme, por lo que tiene que ser dividida con entradas independientes.

⁷ Los HFH se obstruyen mayormente por la colmatación de la zona de entrada con los sólidos en suspensión o la acumulación del biofilm (lodos). Esta es causada por un pobre pre tratamiento de los efluentes, un área de entrada limitada o por el tipo del material de filtro que es muy fino.

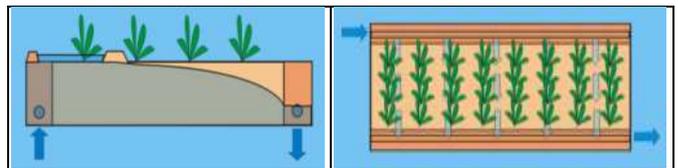


Figura 23 a/b (a) Efluente natural en un HFH y presa de obstrucción para el control en la entrada y (b) recomendación geométrica para grandes HFH (fuente: C. Platzer, 2000)

El tamaño medio de las partículas del filtro deben permitir el flujo continuo del agua residual sin obstruirse, sin embargo, no deben ser demasiado grande para impedir un tratamiento eficaz.

El transporte de oxígeno en HFH es limitado, por lo tanto una mejor nitrificación no es tan esperada, por otro lado la desnitrificación puede ser muy eficiente, incluso a muy baja C/N (Platzer, 1999). Por esta razón, la combinación de humedales de flujo vertical como primer paso, con un humedal de flujo horizontal, como segundo paso puede utilizarse cuando se requiere la eliminación de nitrógeno (4,3).

4.2 Humedales de Flujo Vertical (HFV)

Los humedales de flujo vertical son cada vez más populares que los HHA de flujo horizontal, especialmente cuando el espacio es limitado ya que tienen una mayor eficiencia en el tratamiento.

En humedales de flujo vertical (HFV) el agua es bombeada hacia la superficie del lecho, para percolar verticalmente hacia abajo a través de la capa de filtro hasta la parte inferior donde evacua a través de un sistema de drenaje (tubos de recolección cubiertos con grava) (Figura 5a, véase también la Figura 24). El proceso de tratamiento se caracteriza por descargas intermitente de intervalos cortos de tiempo (4 a 12 dosis/día; DWA, 2006) y largos períodos de descanso, donde las aguas residuales se filtran a través del sustrato insaturados y la superficie seca. El proceso de descarga lotes intermitente mejora la transferencia de oxígeno y ayuda a las actividades de degradación aeróbica (Platzer, 1999).

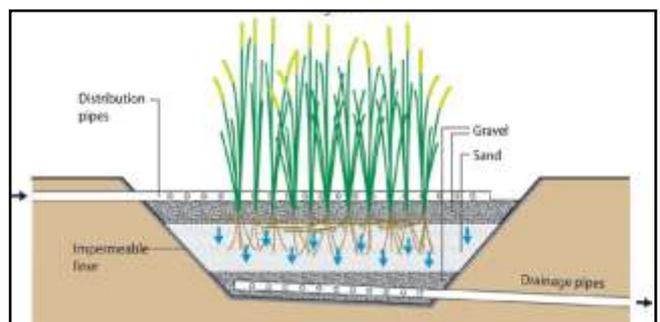


Figura 24. Esquema de la sección transversal del humedal artificial vertical de flujo sub-superficial (fuente: Morel y Diener, 2006)

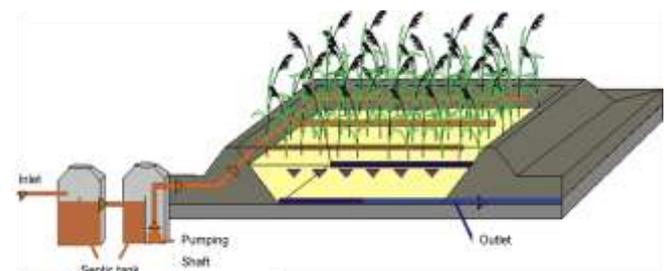


Figura 25. Esquema de la sección transversal del flujo vertical de un HA FSS con pre-tratamiento (fuente: <http://www.bodenfilter.de/engdef.htm>)

Recomendaciones de diseño básico para HFV son:

- La superficie superior del filtro siempre tiene que ser horizontal y las tuberías de distribución a menudo están cubiertas con grava para evitar la acumulación de aguas descubiertas durante los períodos de bombeo
- Las tuberías de alimentación (Figura 26) deben estar diseñadas para permitir la distribución del efluente pretratado de manera uniforme sobre el lecho de todo el humedal. Esto se consigue mediante la selección adecuada de la sección transversal de las tuberías de distribución, la longitud de las tuberías, el diámetro y la distancia entre los agujeros de alimentación
- Para HFV de gran tamaño una pendiente inferior de 0,5-1% en dirección a la salida es lo más importante, la distancia entre las tuberías de drenaje es variable (una buena referencia es a una distancia de 5 m). El tubo de drenaje siempre está cubierto con grava.
- La profundidad en los lechos del filtro de arena debe ser de al menos 50 cm, (adicionales a los 20 cm de grava en el fondo, 15 cm de grava en la parte superior y 15 cm de borde libre para la acumulación de agua).
- **El área específica para la superficie en las regiones más frías generalmente el tamaño varía entre 2 a 4 m² / PE y entre 1-2 m² / PE en las regiones cálidas.** Sin embargo, esto también puede variar dependiendo de la opción de la reutilización (la legislación local). Los autores tienen una gran experiencia en el diseño de HFV en climas cálidos con cerca de 1,2 m²/PE (con temperaturas mínimas en invierno > 8 ° C, promedio anual de 20 ° C) (Platzer, et al., 2007)
- **Para la carga orgánica del HFV en climas fríos se recomienda 20 g DQO m².día** (DWA, 2006), lo mismo para aguas grises y aguas residuales. Los autores tienen una gran experiencia (nitrificación 90%) en el diseño de HFV en **climas cálidos**, con alrededor de **60-70 g DQO m². día** (que corresponden más o menos **30-35 g DBO₅/ m². día**). (Platzer, et al., 2007)
- **La carga hidráulica para HFV en el climas fríos no debe superar los 100-120 mm/d** (DWA, 2006). Las propias experiencias de los autores con aguas residuales pre tratadas con más de 200 mm / d, dieron resultados negativos. El factor clave en climas cálidos es dimensionar con la disponibilidad de oxígeno.(Platzer, et al., 2007)



Figura 26. Humedal recién sembrado de flujo vertical (FV) durante el bombeo (Lima, Perú) para el tratamiento de las aguas grises. Toda la superficie es utilizada como área de entrada, la cual se recubre con grava (fuente: H. Hoffmann, 2008).

El desarrollo de los humedales de FV ha sido muy fuerte desde la primera publicación de los resultados de la conferencia de IAWQ en Cambridge (Cooper y Findlater, 1990). Debido a su gran capacidad de depuración de la carga orgánica y la nitrificación, los humedales de FV fueron una especie de " top of the art " en los últimos 20 años. Se ha comprobado que los humedales al ser operados adecuadamente tienen tasas muy altas de depuración (Cooper et al., 1996; Platzer, 1999; Philipi et al., 2006; Platzer, et al., 2007).

Los sólidos en suspensión y la materia orgánica pueden ser removidos en un 90-99% y con una nitrificación casi completa al 90% la oxidación del amoníaco es comúnmente registrada. Sin embargo la nitrificación depende en gran medida del suministro de oxígeno y para el dimensionamiento es indispensable calcular el consumo de oxígeno en el HFV (Platzer, 1999; Cooper, 2005; Platzer, et al., 2007). Por otra parte, ya que el HFV no proporcionan mucha desnitrificación, el nitrógeno se mantiene como nitrato en el efluente (ver 3.1) por lo tanto, las bajas tasas totales de remoción del nitrógeno se puede lograr cuando los efluentes son tratados sólo en HFV.

En el diseño de estos sistemas, se tiene que considerar que este tipo de lechos tienen sus limitaciones. Un aspecto importante del HFV es el riesgo potencial de obstrucción del suelo que puede provocar un fallo general del sistema (Cooper & Green, 1994; Platzer y Mauch, 1996; Winter & Goetz, 2003).

Las experiencias con la obstrucción del suelo en HHAA son ampliamente variadas, el verdadero problema depende de muchos factores, y las siguientes consideraciones son recomendaciones generales (Platzer, 2001 - adaptada a los conocimientos más recientes).

El principal factor para el buen funcionamiento del HFV es una óptima aireación del suelo. **Con el fin de provocar la oxigenación del suelo:**

- Los humedales de FV tienen que ser alimentados de manera intermitente (4-12 veces / d).
- Es indispensable una distribución uniforme de las aguas residuales
- La carga hidráulica no debe exceder los 150 g/m²d (parámetro regular de las aguas residuales domésticas).
- Se recomienda que los sólidos filtrables tengan cargas menor de 5 g/m²/día (pre-tratamiento eficiente)
- La carga orgánica en climas fríos son limitadas a 25 g DQO / m². d (Platzer, 1999), pero bajo condiciones subtropicales, se ha encontrado que no hay limitaciones de carga orgánica cuando se refieres a obstrucción. Humedales de FV en el sur de Brasil son operados desde hace años sin problemas de atascos de hasta 50 g DQO / m².d (Philippi et al., 2006; Platzer, et al., 2007).
- Las plantas adecuadas con rizomas/raíz desarrollados para el sistema juegan un papel importante en el mantenimiento y la restauración de la conductividad del suelo.
- Preferentemente los HHAA con FV deben operar al menos con 4 lechos independientes, la finalidad es dar descanso de forma regular a cada uno (es decir, 6 semanas en funcionamiento y 2 semanas de descanso).

La provisión de oxígeno en el HFV es el componente clave para la eficiente degradación de la materia orgánica, la nitrificación e incluso para evitar obstrucciones. Por esto el di-

mensionamiento general por m²/pe. no es suficiente para garantizar un buen resultado del tratamiento. Además, es difícil definir una unidad correspondiente por persona si es que hay una separación de aguas grises y aguas negras. La experiencia demuestra que en climas cálidos la necesidad de área está limitada principalmente por la demanda de oxígeno para el proceso de degradación, mientras que en climas fríos está limitado por el aspecto de obstrucción (carga orgánica y carga de SS). Esto significa que, incluso si el oxígeno necesario puede entrar en el lecho del filtro, la actividad biológica todavía está limitada por la temperatura del suelo y la obstrucción (Platzer, 1998).

El primer dimensionamiento del HFV basado en la demanda de oxígeno fue desarrollado por Cooper (1999). Un enfoque similar fue desarrollado por Platzer (1999) sobre la demanda de oxígeno con resultados relativos a la aireación del suelo con el fin de llevar a cabo un balance de oxígeno. De acuerdo con estos resultados el dimensionamiento del HFV depende de la demanda de oxígeno (por la oxidación de materia orgánica y nitrificación) y el aporte de oxígeno (sobre la carga de la frecuencia, sobrecarga del volumen, las raíces y la superficie). La recarga de agua por lotes intermitente es más significativa para la entrada de oxígeno, hay que tener en cuenta que en el HFV una transferencia de suficiente oxígeno está garantizada sólo cuando la aplicación y la infiltración se producen en períodos de corto tiempo con suficiente distancia para la siguiente recarga. Además, un pretratamiento eficiente reduce significativamente la demanda de oxígeno en el HA, la consecuencia es una menor área de ocupación.

En el futuro podría ser posible reducir el área del HVF mediante un cálculo exacto de la demanda de oxígeno y la entrada de oxígeno

4.3 Ejemplos de proyectos y experiencias de humedales de FH y FV de aguas residuales y tratamiento de aguas grises

Hay más experiencias disponibles en humedales para el tratamiento de aguas residuales comunales que para el tratamiento de aguas grises. El tratamiento de aguas residuales está mejor investigado, además, las aguas residuales comunales normalmente son más uniforme que las aguas grises. Por lo tanto los resultados pueden ser transferidos fácilmente a otros proyectos, mientras que los proyectos de tratamiento de aguas grises siempre tienen que ser reconsiderados por la composición específica del afluente.

El "diseño" más simple de HHAA para el tratamiento de aguas residuales comunales es con el parámetro de área requerida por persona. Este parámetro puede ser utilizado como un "cálculo rápido", con el fin de comprobar la disponibilidad del espacio en general, pero no debe ser utilizado sin el control de la carga hidráulica, el cálculo hidráulico, la aplicación de la Ley de Darcy y la carga orgánica en m².d.

La tabla 5 da una idea de cómo el clima y el tipo de flujo (FH/FV) influye en el área de ocupación del HA, esta información puede ser utilizada como orientación y tiene que ser leída como: cuanto menor sea el área de un HA, en comparación con la recomendación contenida de la Tabla 5, es más probable una sobrecarga, lo que provocaría graves problemas de funcionamiento y la pérdida de eficiencia del tratamiento, mientras que HHAA de gran tamaño no suelen tener problemas con la eficiencia del tratamiento, pero ocupan extensas áreas innecesarias que son más caras.

Tabla 5. Regla de los números pulgares para estimar el requerimiento de área en diferentes condiciones climáticas de las aguas residua-

les comunales, ejemplo para 50 PE. (¡Sólo se utiliza para el control, nunca para diseñar HHAA!)

Agua residual comunal 50 pe.	Clima frío Promedio anual < 10°C		Clima caliente Promedio anual > 20°C	
	FH	FV	FH	FV
m ² /pe.	8	4	3	1,2
Área m ²	400	200	150	60

El método más seguro para optimizar el tamaño del HA es un eficaz tratamiento previo (sección 3.5) y el cálculo casi exacto de la carga real (carga = volumen x Concentración del efluentes pre tratado), puede utilizarse en aguas residuales comunales como en aguas grises.

La tabla 6 muestra cómo fueron calculadas por separado las cargas de aguas grises y negras para un colegio en Lima (Perú) (Hoffmann 2008), pues ambas corrientes deben ser tratadas por separado en diferentes HHAA con fines de reutilización en riego. El colegio usa más o menos de 200 m³ de agua potable al mes, alrededor de 18 personas viven constantemente dentro del área y alrededor de 40 personas vienen a fuera, la ocupación diaria se calculó con 70 PE.

Tabla 6. Ejemplo para el cálculo de carga de aguas grises y aguas negras en un colegio de Lima / Perú con 70 PE que dio como resultado la ocupación de áreas separada para los humedales de FV. Las aguas grises no estaban totalmente separadas de las aguas negras.

Unidades	70 pe. Total ¹	Aguas grises		Aguas negras	
		Sepa- ración	Tramp. grasa	Sepa- ración	FC ²
L/d	(100%) 7000	(30%) 2100	No influ- ye	(70%) 4900	No influ- ye
g DBO ₅ d	(100%) 3500	(20%) 700	(-10%) 630	(80%) 2800	(-25%) 2100
m² para HFV en climas cálidos 30 g DBO₅/m². d		-	21,0	-	70,0

¹ EL volumen de aguas residuales fue calculado mediante el uso de agua potable dado por mes, la DBO₅ fue basada en la norma peruana (tabla 2)

² Las aguas negras son pre-tratadas en un filtro de compostero (FC, sección 3.5), se estimó el 25% de reducción de DBO₅.

Por la sencilla razón de que todas las instalaciones sanitarias ya estaban instaladas, la separación de aguas grises sólo pudo darse para la zona comercial de la escuela: panadería, lavandería y dos cocinas, donde se cocinan 60 comidas al día; mientras que los efluentes procedentes de todos los baños (con duchas y lavamanos) y de dos cocinas privada tuvieron que ser tratadas como aguas mixtas "Aguas Residuales Negras". La carga específica tuvo que ser estimada, pero este es un desafío común en los proyectos de ECOSAN, y siempre es recomendable calcularlos con suficientes factores de seguridad, para evitar situaciones de sobrecarga. El cuadro 6 posteriormente ajustado muestra resultados de este proyecto.

La tabla 7 presenta una lista de las eficiencias de varios sistemas de HHAA para el tratamiento de aguas grises de acuerdo a sus tasas de eliminación. Las tasas de eliminación de materia orgánica y SST son muy altas.

Tabla 7. Las tasas de extracción (en%) de humedales de FH y FV (HHAA FSS) para el tratamiento de aguas grises.

Parámetros	HFH (Morel y Diener, 2006)	HFV (Ridderstolpe, 2004)
DBO ₅ (Demanda Biológica de Oxígeno)	80 - 90	90 - 99
SS (Sólidos Suspendidos)	80 -95	90 - 99
TN (Nitrógeno Total)	15 - 40	30

Después de 2 años de funcionamiento la remoción de DBO₅ en los humedales de FV de aguas grises (21 m², ver este HA en la Figura 2) y aguas negras (70 m²) es del 95%, la eliminación de sólidos en suspensión es de aproximadamente 90% y la eliminación de detergentes es el 76% en el HFV de las aguas grises y el 86% en el HFV de aguas negras, la concentración de bacterias Coliformes termotolerantes es inferior a 10 m³/100 ml. Toda el agua tratada es utilizada en el riego de cultivos, árboles y areas verdes (Hoffmann, 2008).

Las tasas de eliminación del fósforo no pueden ser dadas como eliminación de fósforo depende en gran medida de las condiciones del suelo y hasta el momento un dimensionamiento adecuado para la remoción de P no existe (3.1).

Varios tipos de HHAA pueden ser combinados con el fin de lograr una mayor eficiencia del tratamiento, especialmente para la eliminar el nitrógeno. Estas combinaciones tienen las ventajas de ambos sistemas: FH y FV (Figura 27), los cuales se combinan para complementarse mutuamente, lo que también provoca una eliminación más alta de patógenos (3,6).



Figura 27. Humedales construidos en la ciudad de Bayawan. El espacio se encuentra entre los lechos de flujo subsuperficial horizontal y vertical (fuente: J. Boorsma, 2009)⁸.

Por lo tanto, ha habido un creciente interés en sistemas híbridos, aunque no son realmente relevantes para la mayoría de los países en desarrollo, porque son más caros de construir y más complicados de operar que los sistemas no-híbridos. Los sistemas híbridos más utilizados comprenden de HFV primero seguido por el HFH de FSS, dispuestos de manera escalonada, con un flujo de reciclaje. Los resultados muestran una muy buena eliminación de materia orgánica (DBO₅ y DQO) y sólidos en suspensión, mientras que la eliminación del nitrógeno se incrementa.

La Hasta ahora, existe una falta de conocimiento global de todos los factores que pueden influir en la eficiencia del tratamiento de los humedales. No todas las condiciones (climáticas, características de las aguas residuales, influencia de la planta, la degradación microbiológica de los procesos y sus posibles interacciones entre ellos) son totalmente investigadas y comprendidas. Cada HHAA evaluado, pueden dar información importante para un mejor entendimiento del proceso de tratamiento y ayudar a encontrar nuevas soluciones económicas. Esto se constata, por ejemplo, en el "sistema Francés" (véase la siguiente sección).

Tabla 8 contiene ejemplos de HHAA construidos para aguas grises y aguas residuales domésticas. En climas cálidos, el área específica puede ser muy pequeña ya que la actividad biológica es elevada. Sin embargo, es riesgoso construir humedales que son "agresivamente" diseñados (área específica baja), ya que existe un alto riesgo de que el sistema fracase. Especialmente cuando se hace el primer humedal se recomienda utilizar un dimensionamiento conservador (más grande). Se puede ganar experiencia con la optimización de las condiciones especiales.

Hasta ahora, existe una falta de conocimiento global de todos los factores que pueden influir en la eficiencia del tratamiento de los humedales. No todas las condiciones (climáticas, características de las aguas residuales, influencia de la planta, la degradación microbiológica de los procesos y sus posibles interacciones entre ellos) son totalmente investigadas y comprendidas. Cada HHAA evaluado, pueden dar información importante para un mejor entendimiento del proceso de tratamiento y ayudar a encontrar nuevas soluciones económicas. Esto se constata, por ejemplo, en el "sistema Francés" (véase la siguiente sección).

Tabla 8. Ejemplo de área requerida para HHAA de FSS de FV (para más detalles ver estudios de caso SuSanA⁹).

Área específica (m ² /EP)	HA parámetros del tamaño (valores medidos)	Ubicación (y tipo de agua residual)
0.4	7,000 PE; 2992 m ² ; 300 m ³ /d; 43 L/cap/d	Haran Al-Awamied, Siria (aguas residuales domésticas estabilizadas)
0.9	3000 personas; 2680 m ² ; 150 m ³ /d (50 L/cap/d)	Ciudad de Bayawan, Filipinas (efluentes de fosas sépticas de aguas residuales domésticas) ¹⁰
1.7	140 personas; 240 m ² ; 10-13 m ³ /d (82 L/cap/d)	Hamburgo Allermöhe, Alemania (aguas grises después del tanque de estabilización)
1.7	460 PE; 771 m ² ; caudal no conocido	Ciudad Solar Pichling Linz, Austria (aguas grises y filtrado de aguas marrones (excretas + agua) pre-compostadas)
1.9	270 EP; 500 m ² ; caudal no conocido	Dubai, Emiratos Árabes Unidos (aguas grises estabilizadas)

4.4 El " Sistema Francés" para combinar el tratamiento primario y secundario de aguas residuales crudas

Hace casi 20 años existe un tratamiento especial de flujo vertical con HHAA de FSS para aguas residuales crudas que se

⁸ Ver casos de estudio de SuSanA: <http://www.susana.org/images/documents/06-case-studies/en-susana-cs-philippines-constr-wetlands-bayawan-2009.pdf>

⁹ <http://www.susana.org/lang-en/case-studies/technology/constructed-wetland>

¹⁰ Tipo de humedales FSS-FV seguido por FSS-FH

utiliza en Francia. La descripción del diseño se origina tras una publicación de Molle et al (2005), quien describió las experiencias con este tipo de doble etapa de humedales (RBS-*Reed Bed System*), que llegó a ser muy común en Francia, donde más de 500 plantas son operadas.

La primera etapa del RBS se trata de un lecho de grava y es utilizado para el tratamiento primario de aguas residuales crudas, luego el efluente pre tratado pasa a través del segundo humedal para continuar con el tratamiento, donde el material es arena gruesa.



Figura 28. Sistema Francés de HAA de FSS: 3 filtros para el tratamiento primario y 2 filtros para el tratamiento secundario, Albondón, España (fuente: T. Burkardt AKUT, 2005)

La operación es económica y sencilla, es una alternativa interesante de tratamiento para pequeñas comunidades, sobre todo porque evita el tratamiento primario convencional con los problemas de la producción de lodos primarios y liberación de biogás (3,5).

Molle et al (2005) recomiendan dividir la primera fase (para el tratamiento de aguas residuales crudas) en 3 filtros, la segunda fase (tratamiento secundario del efluente) en 2 filtros como se ve en la Figura 28.

La etapa de tratamiento primario es operada en fases alternadas para controlar el crecimiento de la biomasa y mantener condiciones aerobias en el lecho filtrante. Cada filtro recibe todas las aguas residuales comunales primarias durante 3-4 días, con un descanso de 6-8 días, mientras los otros filtros son utilizados. El agua residual cruda es filtrada verticalmente, pasando primero a través de una capa de 30 cm con grava fina (2-8 mm), después por una capa de transición de 10-20 cm (con grava de 5 mm), para llegar a la capa de drenaje (grava con 20-40 mm de tamaño de partículas) en el fondo del filtro (Figura 29). Los sólidos son retenidos en la superficie, donde se mineralizan (Figura 30).

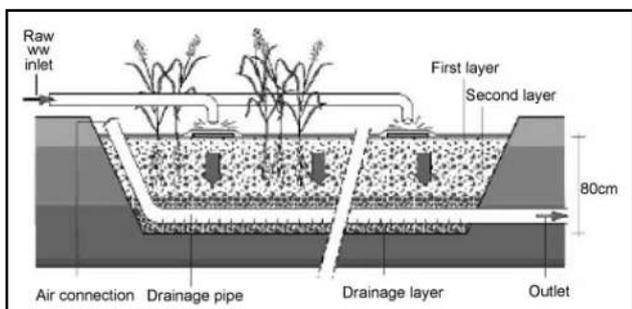


Figura 29. Tratamiento primario de aguas residuales crudas, etapa primaria del sistema francés (publicado por Molle et al., 2009).



Figura 30. Detalles técnicos del tratamiento primario de aguas residuales crudas en el sistema francés de HAA de FSS: Albondón, España (fuente: T. Burkardt AKUT, 2007)

Los dos filtros verticales para el tratamiento secundario pueden ser operados en paralelo, con la opción de que un filtro descansa o alterne con el otro. Los segundos filtros son de grava y tienen una capa de 30 cm de arena (0,25 mm > d₁₀ > 0,4 mm). En Francia los filtros primarios y secundarios son plantados sólo con carrizo (*Phragmites australis*).

Para dimensionar Molle et al. (2005) recomienda

- Para el primer paso: 1,2 m²/pe (equivalente a una carga promedio de 100 g DQO / m².d, 50 g de SS/m².d, 10 g de NTK/m².d y 120 m³/l.d) dividido en más de 3 unidades idénticas alimentadas alternativamente.
- Para el segundo paso: 0,8 m²/pe dividido en 2 paralelas idénticas o alimentando 2 unidades en alterno (con un resultado de carga muy baja en el efluente, un promedio de 25 gDQO/m².d).

Molle et al. (2005) reportó que un lecho de grava con carga muy alta 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 (3,5) y en muchos países sería suficiente para descargar el agua al río. Los sólidos retenidos forman una capa de lodo, que limita la infiltración pero mejora la distribución del agua en la superficie. El crecimiento de lodo mineralizado es de 1,5 cm aproximadamente por año, éste tiene que retirado después de 10-15 años (cuando se acumulan unos 20 cm), la reutilización de estos lodos con fines agrícolas es posible, pero depende, como siempre en la reutilización de los lodos, de los compuestos especiales (metales pesados) de las aguas residuales tratadas.

El tratamiento secundario es principalmente para completar la nitrificación, para los efectos de polución de la DQO y los SST y la eliminación de patógenos

En total la doble etapa del sistema francés de RBS para el tratamiento de agua cruda eliminando el 90% de DQO, el 96% de los SST y el 85% de NTK tiene una menor área, cuando se le compara con HFV para el tratamiento secundario en climas fríos. La primera planta con este tipo el tratamiento con aguas residuales municipales junto con el escurrimiento de aguas pluviales, tuvo funcionamiento en Alemania en 2009, algunas de estas plantas están ahora en funcionamiento en Portugal y España (Figura 28).

Para situaciones descentralizadas es muy interesante el bajo costo de operación, donde es posible utilizar sifones autocebantes para la alimentación (proceso de carga intermitente por lotes) de los lechos filtrantes. Los sifones necesitan suficiente diferencia de altura entre los niveles del afluente y la superficie. De esta manera ni siquiera es necesaria la energía para las bombas, ya que este sistema de tratamiento aeróbico es completo y con gran eficiencia. La planta presentada en la Figura 28 no requiere de ninguna fuente eléctrica.

4.5 Indicación de Costo

Los gastos de construcción de un HA de FSS varían mucho dependiendo de la disponibilidad de arena y grava, que son los componentes más importantes. La regresión de los costos para grandes humedales artificiales, es mucho menor que para las plantas técnicas más compactas. Por lo tanto una ventaja del posible costo para las pequeñas plantas (<500 pe.) se convierte en una desventaja de costo para las de grandes escalas cuando sólo se comparan los costos de inversión. En todos los casos el principal argumento de los humedales construidos no son sólo los bajos costos de inversión. El argumento más importante es la seguridad de funcionamiento en situaciones descentralizadas donde una capacitación técnica para el funcionamiento del sistema tiene costos mayores de operación para lograr una seguridad similar en el funcionamiento.

En comparación con lagunas de oxidación los humedales artificiales (FV) son aproximadamente un 20% inferior en climas cálidos, pero tienen el inconveniente de que la "cavidad en la tierra" tiene que estar "llena de arena". Así que en una comparación sin incluir los costos, incluso los humedales de FV presentan menos ventajas que las lagunas de tratamiento. Sin embargo, hay una serie de aspectos que se debe tener en cuenta a la hora de tomar la decisión entre las diferentes posibilidades de tratamiento. Las ventajas de los HHAA en comparación con lagunas de tratamiento son, por ejemplo: no tiene olor, no atrae mosquitos, no tiene producción de lodos secundarios y un efluente transparente, libre de algas (ver sección 2.5).

5 Operación y mantenimiento

5.1 Tareas comunes para todos los HHAA

Aunque los HHAA son sistemas "naturales" de fácil operación, aún requieren de un mantenimiento adecuado. Las siguientes tareas deben ser realizadas:

- Comprobar periódicamente la eficiencia de las unidades de pre tratamiento (mientras mayor sea el sistema, mayor será la frecuencia). La prueba más importante a realizar es la de sólidos en el tanque Imhoff, con el fin de conocer la cantidad de sólidos que son transferidos a los humedales. Los lodos producidos deben ser removidos con frecuencia.



Figura 31. Trampa de grasa colapsada - el lodo obstruye la zona de infiltración, la cual se vuelve negra debido a la falta del transporte de oxígeno (obstrucción) (fuente: H. Hoffmann 2009)

- Controlar regularmente el color y olor del efluente del humedal que da información importante acerca de la calidad y el funcionamiento del lecho:
 - La detección de turbiedad y/o color grisáceo, indica un insuficiente suministro de oxígeno. La reacción debe ser: En el caso de humedales de FV se debe controlar una distribución uniforme, podría suceder que los plazos de alimentación son muy cortos / a menudo, por lo tanto la superficie no logra secar o el lecho está obstruido. En el caso de humedales de FH el drenaje del efluente debe reducirse con la finalidad de permitir una entrada mayor de oxígeno.
 - El mal olor de las aguas tratadas (como "huevos en descomposición") indica procesos anaeróbicos y por lo tanto una situación muy crítica. El lecho debe estar en reposo y la recarga debe disminuir o el suministro de oxígeno en el humedal debe ser mejorado (véase líneas arriba).
 - Efluentes claros pero con color, ligeramente amarillo o marrón, es una situación normal en los tratamientos biológicos, especialmente en humedales (por los ácidos húmicos, sección 3.6).
 - En el efluente a veces se produce sustancia aceitosa, especialmente en HFH, el efecto puede ser provocado por las sustancias húmicas del lecho.
- Comprobar los sistemas más grandes (> 500 pE):
 - Unidades de pre-tratamiento (prueba de sólidos en el cono Imhoff)
 - Entrada en el sistema (obstrucciones, nivel de agua)
 - Salida del sistema (nivel de)
- Comprobar periódicamente las bombas
- Comprobar periódicamente la carga contaminante, la concentración de contaminación en el afluente y en el efluente y la tasa de carga hidráulica.
- Inspeccionar en la vegetación de los humedales que no haya enfermedades, insectos, etc., y dar el tratamiento adecuado según sea necesario.
- Se debe prestar especial atención a las malezas o plantas depredadoras hasta que la vegetación de los humedales estén plenamente establecida.

Si el mantenimiento es ignorado, las siguientes consecuencias se verán tarde o temprano:

- Distribución irregular del flujo
- Sobrecarga localizadas y olor
- Disminución de la eficiencia del tratamiento

Ya sea que las plantas de los HHAA deban ser segadas con regularidad o no, es una cuestión de debate, no se puede dar una regla general. Sin embargo las plantas tienen que ser removidas cuando afectan el funcionamiento o las actividades de mantenimiento



Figura 32. Remoción de papiro (*Cyperus papyrus*) de un HFV debido a su crecimiento extremo (fuente: H. Hoffmann, Lima Perú 2009)



Figura 33 a/b La capa superficial de raíces puede obstruir las tuberías de distribución con raíces y humus (tratamiento de aguas negras en operación después de 2 años). (Fuente: H. Hoffmann, 2009)

Ventajas de segar las plantas de los HHAA incluyen:

- Absorber los nutrientes que serán eliminados del sistema
- A veces se hace difícil realizar las tareas de mantenimiento (en HFV), cuando las plantas no han sido podadas. (Figura 32).
- Es posible utilizar el material vegetal como material de forraje o paja (Figure 34).



Figure 34: Vetiver segado de un HFV después de 8 meses de sembrado, cuando los tallos empezaron a quebrarse, luego fueron utilizados como paja para el filtro de compostaje de aguas negras, Lima, Perú (fuente: H. Hoffmann, 2009)

Las ventajas de no segar las plantas en los HHAA incluyen:

- crea una capa aislante de material vegetal muerto (sólo es importante para los climas más fríos)
- provee de una fuente de carbono para la desnitrificación

- no altera el funcionamiento ecológico de los humedales

5.2 Tareas comunes para la explotación de HFH

Lo más importante a controlar es que no se produzca obstrucciones en el sistema. Esto se produce principalmente en los humedales de FH que son bastante largos y que tienen una alta carga hidráulica en la zona de entrada que es relativamente corta.



Figura 35. Humedal de flujo horizontal, entrada de piedras para una mejor distribución, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú (fuente: Miglio, 2009)

- El HFH puede ser dividido por la mitad, de manera que mediante esta estructura de doble entrada se reduzca drásticamente la posibilidad de obstrucción. Otra posibilidad es implantar una pequeña presa en los 2 m iniciales del lecho (Figura 23 a) para que esta parte del HFH sirva como zona de entrada del filtro (Figura 35).
- Cuando hay lodo acumulado en la zona de entrada del HFH éste debe ser retirado del sistema para ser secado de no poder ser retirado todo el material del filtro afectado debe ser cambiado.
- Especialmente para el caso de HFH es recomendable tener la posibilidad de embalsar el lecho filtrante por completo para controlar el crecimiento de las plantas en el humedal.
- Con el fin de garantizar una suficiente aireación del lecho, es recomendable tener la posibilidad de bajar el nivel del agua hasta la parte inferior del HFH.

5.3 Tareas para el funcionamiento de HFV

Los humedales artificiales de FV necesitan de mayor operación y de mantenimiento que los de flujo horizontal. Por lo que las siguientes tareas deben ser realizadas:

- Para los humedales de FV es importante una distribución uniforme de los efluentes pre-tratados en toda la superficie, la que tiene que ser controlada (Fig. 36 a). Las válvulas al inicio de las tuberías de distribución y las tapas removibles al final de estas facilitan la limpieza de los tubos (Fig. 36 b). Las válvulas también serán cerradas cuando haya áreas afectadas por obstrucción que necesitan descansar.
- Debe asegurarse que las aguas residuales sean cebadas en intervalos, a través de un sistema automático de bomba o sifón (excepción: humedales de FV para el tratamiento de aguas grises en casas familiares, que pueden ser diseñadas sin este sistema, por el uso de

estas aguas que se dan naturalmente en periodos, no obstante, se debe garantizar que las aguas grises pre-tratadas estén bien distribuida en todo el filtro y que la superficie se seque entre las descargas).

- Cuando se produce obstrucción en el sistema, la reacción debe ser inmediata. La obstrucción es una respuesta normal a la actividad biológica. El "secreto" de un buen proyecto de humedales es diseñar el sistema lo suficientemente grande para que tenga periodos de descanso en algunas partes del lecho, o que la carga sea tan baja para que no se produzca obstrucción debido al proceso de degradación natural. Un HFV se recupera muy bien con un periodo de 14 días de descanso, tiempo en que el filtro puede secar. Esto no funciona en épocas de invierno con periodos de congelación o situaciones de baja temperatura (0-8 °C), por eso los humedales de FV tienen que ser diseñados con mayor tamaño en los lugares de clima frío (tabla 5).
- Es mejor sobrecargar una parte de la cama con el fin de dar a la otra parte un descanso, que esperar que el sistema se recupere. Una vez que está obstruido el sistema no se recupera sin periodos de descanso, pero se ha demostrado que con periodos de descanso la permeabilidad del HFV se recupera casi por completo (Platzer y Mauch, 1997).



Figure 36 a/b: (a) Limpieza de la tubería de distribución, abriendo y cerrando las válvulas y las tapas durante la fase de bombeo, (b) tapa abierta de una tubería de distribución bloqueada (fuente: H. Hoffmann, 2009)

6 Referencias

6.1 Referencias usadas en este documento

Abegglen, C.; Joss, A.; Boehler, M.; Buetzer, S.; Siegrist, H. (2009): Reducing the natural color of membrane bioreactor permeate with activated carbon or ozone. Water Science & Technology – WST/ 60.1/ 2009 IWA Publishing

ATV-DVWK-A 131 (2000) Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, ISBN 978-3-933707-41-3, Germany <http://www.dwa.de/dwa/shop/shop.nsf/Produktanzeige?openform&produktid=P-DWAA-7AHD5W&navindex=040201&kategorie=2&ugruppe=Arbeitsbl%E4tter>

Blumberg, M. (2009) Constructed wetlands presentation, www.blumberg-engineers.de (contact@blumberg-engineers.de)

Borda <http://www.borda.de/pdfs/DEWATS.pdf>

Cooper, (2005) Wetland Systems for Water Pollution Control IX. pp. 81-90. Water Science & Technology. Vol. 51, no. 9.

Cooper, P.; Green, B. (1994). Reed Bed Treatment Systems for Sewage Treatment in the United Kingdom- the First 10 Years Experience. in: Proceedings of the 4th IAWQ Conference on Wetland Systems in Water Pollution Control, 6.-10.11.1994, Guangzhou. 58-67.

Cooper P.F. and Findlater B.C. (edit.)(1990). Proceedings of the International Conference on the Use of Constructed wetlands in Water Pollution Control, 24 – 28 .09.1990, Cambridge, UK

Carden, K., Armitage, N., Winter, K., Sichone, O., 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>

DWA (2006) German guidelines: Arbeitsblatt DWA-A 262 Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit bepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers, DWA Hennef, Germany (in German).

FLL/IÖV (2008) Empfehlungen für Planung, Bau, Pflege und Betrieb von Pflanzenkläranlagen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V., Ingenieurökologische Vereinigung e. V., Bonn (in German).

Gajurel DR, Benn O, Li Z, Behrendt J, Otterpohl R. (2003) Pre-treatment of domestic wastewater with pre-composting tanks: evaluation of existing systems. Wat. Sci. Tech. 48(11-12):133-8. (see <http://www.sciencedirect.com/> for abstract)

Guylas, H.; Choromanski, P.; Furmanska, M.; Muelling, N.; Otterpohl, R. (2007) Photocatalytic oxidation of biologically treated greywater in presence of powered activated carbon, International Conference on Sustainable Sanitation, Food and Water Security for Latin America, Fortaleza, Brazil, 2007 www2.gtz.de/.../en-photocatalytic-oxidation-of-biologically-treated-wastewater-2007.pdf

Hagendorf, U., Diehl, K., Feuerpfeil, I., Hummel, A., Szewzyk, R., 2000: Retention of microbiological Organisms in Constructed Wetlands. 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Florida, USA

Heers, M. (2006) Constructed wetlands under different geographic conditions: Evaluation of the suitability and criteria for the choice of plants including productive species. Masters thesis, Hamburg University of Applied Sciences, Germany Faculty of Life Sciences <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 Christoforus – Lima, Conferencia Peruano de Saneamiento, PERUSAN; Perú , 25-27.11.2008

ITRC (2003) Technical and Regulatory Guidance Document for Constructed Treatment Wetlands, The Interstate Technology & Regulatory Council Wetlands Team, USA, <http://www.itrcweb.org/guidancedocument.asp?TID=24>

Jenssen, P., Krogstad, T., Vråle, L., Mæhlum, T. (2008) High performance constructed wetlands for cold climates, power-

- point presentation
<http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/en-high-performance-constructed-wetlands-2008.pdf>
- Jordão, P. E. & Pessoa, A. C. (2005) Tratamento de Esgotos Domésticos 4ª. Edição ISBN -85-905545-1-1 Printed in Brazil by SEGRAC, 2005
- 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>
- Kivaisi, A. K. (2001) The potential for constructed wetlands for waste water treatment and reuse in developing countries: a review. Ecol. Eng. 16: 545-560. Abstract available here: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8574\(00\)00113-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8574(00)00113-0)
- Metcalf & Eddy (2003) Wastewater Engineering Treatment and Reuse, Fourth Edition, published by Mc Graw-Hill, New York 2003 , international Edition ISBN 0-07-112250-0
- Mohamed, A. (2004) Planung, Bau und Betrieb einer Pflanzenkläranlage in Syrien (Planning, construction and operation of a constructed wetland in Syria). PhD thesis, University Flensburg, Germany (in German)
<http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/de-pflanzenklaeranlage-syrien-2004.pdf>
- Molle, P.; Liégnard, A.; Boutin, C.; Merlin, G.; Ivema, A. (2005): How to treat raw sewage with constructed wetlands, an overview of the French system, Water Science technology, Vol. 51, no 9, pp 11-21, IWA Publishing 2005
- Morel A., 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>
- Norma de Saneamiento S.090 (1997) Resolución Ministerial Nº 048-97-MTC/15 VC del 27/01/97 - Reglamento Nacional de Construcciones, Perú
- Otterpohl, R. Innovative reuse oriented water concepts high-, medium- and low-tech options (slide 30 and 31)
http://www.tu-harburg.de/aww/lehre/wbt/emwater/documents/slides_b1.pdf
- Platzer, C. & Mauch, K. (1997) Soil Clogging in Vertical-flow Reed Beds - Mechanisms, Parameters, Consequences and.... Solutions?. Wat. Sci. Tech. Vol 35, No. 5. pp 175-181
- Platzer, C. (1998). Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Stickstoffelimination in Pflanzenkläranlagen. Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 6, TU Berlin, Fb. 6
- Platzer, C. (1999) Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. Wat.Sci. Tech., v. 40, n. 3, pp. 257-263.
- Platzer, C. (2000) Development of Reed Bed Systems - A European Perspective in: Proceedings of the 7th IAWQ Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. 11-16/11/2000, Orlando.
- Platzer, C., S. C., Hoffmann, H., Cardia, W., 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
- Philipi, L. S.; Sezerino, P. H.; Bento, A. P.; Magril, M. E. (2006) Vertical Flow Constructed Wetlands for Nitrification of Anaerobic Pond Effluent in Southern Brazil under Different Loading Rates. In: Proceedings of 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Almada, Portugal : IWA - MAOTDR, v. I., pp. 631-639, 2006.
<http://www.gesad.ufsc.br/download/Philippi%20et%20al.%20WV%20-%2010th%20IWA.pdf>
- Raude, J., Mutua, B., Chemelil, M., Sleytr, K. (2009) Characterization of urban and peri-urban greywater of Nakuru municipality, Kenya. 34th WEDC conference in Addis Ababa, Ethiopia.
- 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.; Platzer, C. (2001), Nutrient removal in subsurface flow constructed wetlands for application in sensitive regions, Wat.Sci. Tech., V. 44 11-22, pp. 149-155
- Seidel, K. (1965) Neue Wege zur Grundwasseranreicherung in Krefeld (New methods for groundwater recharge in Krefeld), Teil II: Hydrobotanische Reinigungsmethode, GWF Wasser Abwasser 30, 831-833 (in German).
- van Haandel A and Lettinga G. (1995) Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate publisher: John Wiley & Sons, pp.236
- Vymazal, J. and Kröpfelová, L. (2008) Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. In Environmental Pollution 14
- Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Green, B. and Haberl, R. (eds) (1998) Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, the Netherlands, 366 p.
- WHO (2003) WHO Library Cataloging-in-Publication Data: Right to water, Health and humans rights publication series; no. 3, ISBN 92 4 15906 4
http://www.who.int/water_sanitation_health/humanrights/en/
- WHO (2006) WHO Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volume 4: Excreta and greywater use in agriculture. World Health Organisation, Geneva, Switzerland.
http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/gsuw_eq4/en/index.html

Winter, K.J., Goetz, D. (2003). The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Wat.Sci.Tech.*, v.48, n.5, pp. 9-14.

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

WPCF (1990) Natural systems for wastewater treatment: Manual of Practice FD-16, Water Pollution Control Federation, Alexandria, VA, USA

6.2 Otras lecturas recomendables

Geller, G. und Höner, G. (2003) Anwenderhandbuch Pflanzenkläranlagen (Users manual for constructed wetlands). Springer – Berlin (in German).

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

Hammer, D. A. and Bastian, R. K. (1989) Wetland ecosystems: Natural water purifiers? Pp. 5- 20. In *Constructed wetlands for wastewater treatment*. D.A. Hammer, ed. Lewis publishers, Chelsea, Michigan

IWA Publishing: *Water Science & Technology* vol. 35 (1997) and vol. 51 (2005)

6.3 Fotos

Una gran colección de fotos relacionadas con los proyectos ECOSAN ha sido recopiladas por el equipo GTZ ecosan y socios en el sitio web para compartir fotos Flickr.com.

Para ver las fotos de los humedales artificiales, siga este enlace:

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