



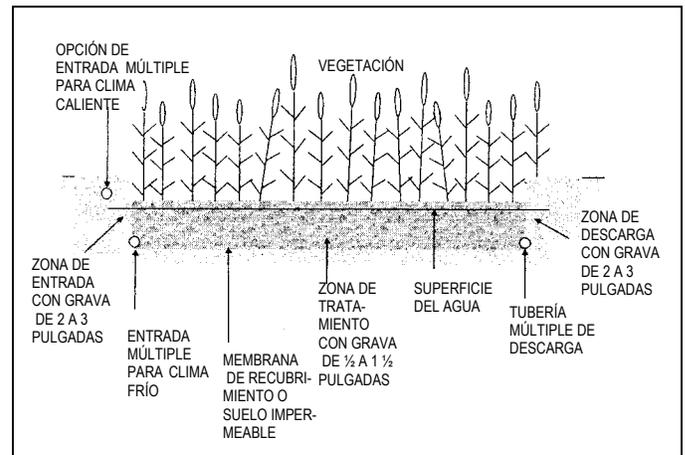
Folleto informativo de tecnología de aguas residuales

Humedales de flujo subsuperficial

DESCRIPCIÓN

Los sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y/o el tipo de vegetación presente. La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo libre superficial en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera; estos incluyen a los fangales (principalmente con vegetación de musgos), las zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea y plantas macrófitas emergentes). Un humedal artificial de flujo subsuperficial (FS, *subsurface flow wetlands*) está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Un ejemplo de un humedal FS se muestra en la Figura 1. La grava es el medio más utilizado en Estados Unidos y Europa, aunque también se ha utilizado roca triturada, grava, arena y otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada. En contraste, la superficie del agua en los pantanales naturales y en los humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS, *free water surface wetlands*)

está expuesta a la atmósfera, lo cual conlleva los riesgos de los mosquitos y de acceso del público.



Fuente: adaptado de un dibujo de S.C. Reed, 2000.

**FIGURA 1 HUMEDAL DE FLUJO
SUBSUPERFICIAL**

La mejora en la calidad del agua en humedales naturales ha sido observada por científicos e ingenieros durante muchos años, y ha llevado al desarrollo de humedales artificiales para duplicar en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat de los humedales naturales. Se considera que las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido. En el caso de los humedales FLS esos sustratos son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los detritos vegetales, y la capa béntica del suelo. En humedales FS el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio, y la superficie misma del

medio. Dado que el área de sustrato en un humedal FS puede sobrepasar por mucho el sustrato disponible en humedales FLS, las tasas de reacción microbiana pueden ser mayores que las de humedales FLS para muchos contaminantes. Como resultado, un humedal FS puede tener una menor superficie que un humedal FLS para los mismos caudales y objetivos de calidad del agua.

Las metas de diseño de los humedales FS artificiales son exclusivamente las funciones de tratamiento porque las posibilidades de proporcionar hábitat de vida silvestre y recreación pública son más limitadas que en el caso de los humedales FLS. El tamaño de estos sistemas va desde pequeñas unidades para el tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta un sistema doméstico de tratamiento de aguas residuales en Louisiana con una capacidad de 1.5×10^7 litros por día (4 millones de galones por día, mgd). Existen aproximadamente 100 sistemas de tratamiento de aguas domésticas en los Estados Unidos, pero la mayoría trata menos de 3.8×10^3 m³/día (1 mgd). La mayoría de los sistemas municipales están precedidos por lagunas de tratamiento aireadas o facultativas. Hay cerca de 1000 sistemas de tratamiento a pequeña escala en el punto de origen para viviendas individuales, colegios, complejos de apartamentos, establecimientos comerciales, parques y otras instalaciones recreacionales. El caudal de estos sistemas pequeños va de cientos de galones por día a 151,400 litros por día (40,000 galones por día); el tipo predominante de pretratamiento proporcionado es el de tanques sépticos. Los costos del medio de roca o de grava son más altos y hacen que el uso de sistemas de humedales FS de mayor envergadura sea desfavorable con relación a los humedales FLS a pesar de que aquellos requieran una menor extensión de terreno.

Las comparaciones de costo han mostrado que a caudales mayores a 227,200 litros por día (60,000 galones por día) normalmente es más

económico construir sistemas de humedales FLS. Sin embargo, existen excepciones cuando el acceso público, problemas de mosquitos o asuntos de vida silvestre justifican la selección de humedales FS. Un ejemplo reciente es el de un humedal FS diseñado para tratamiento de la escorrentía del aeropuerto de Edmonton en Alberta, Canadá en donde la escorrentía originada por la nieve derretida es contaminada por el fluido de glicol usado para deshielo; para esto se seleccionó un humedal FS con capacidad de 1,264,190 litros por día (334,000 galones) con el fin de minimizar problemas de hábitat y aves cerca a las pistas de aterrizaje.

Los humedales FS normalmente incluyen una o más cuencas o canales de poca profundidad de fondo recubierto para prevenir la percolación a la capa freática susceptible a la contaminación. El tipo de recubrimiento depende de las condiciones locales. En algunos casos la compactación del suelo local es adecuada, mientras que en otros se debe traer arcilla o utilizar recubrimiento de membranas plásticas (PVC o PAD).

Las estructuras de entrada y descarga se emplean para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada. El método más comúnmente utilizado en los sistemas de menor tamaño consiste de una tubería múltiple perforada. La profundidad del medio en estos humedales FS tiene un rango de 0.3 a 0.9 metros (1 a 3 pies), siendo el valor más común el de 0.6 metros (2 pies). El tamaño del medio en Estados Unidos va desde la grava fina (≥ 0.6 cm o ≥ 0.25 pulgadas) hasta roca grande triturada (≥ 15.2 cm o ≥ 6 pulgadas); La combinación de tamaños de 1.3 a 3.8 cm (0.5 a 1.5 pulgadas) es la más comúnmente usada. Este medio de grava debe ser de piedras limpias, duras y duraderas, con capacidad de retener su forma y la permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo.

La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FS incluye las espadañas

y aneas (*Typha* spp.), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp.). En Europa los *Phragmites* son las plantas preferidas para esta aplicación. Esta planta tiene varias ventajas debido a que se trata de una planta durable de rápido crecimiento que no es una fuente alimenticia para aves o la vida silvestre. Sin embargo, en algunas partes de los Estados Unidos el uso de *Phragmites* no está permitido porque esta es una planta de crecimiento agresivo, por lo cual se tiene la preocupación de que infeste humedales naturales. En estos casos los espadaña y los juncos pueden ser utilizados. La experiencia ha demostrado que en áreas donde se encuentra el ratón almizclero (*muskrat*) o las nutrias, estos pueden destruir completamente las espadañas, aneas y juncos plantados en un humedal artificial, al utilizar las plantas para alimento y anidación. Muchos de los sistemas individuales de menor tamaño usan plantas decorativas tolerantes a la humedad. La vegetación en un humedal FS no es un factor significativo en la remoción de nutrientes y no se requiere su poda. En climas fríos, la acumulación de detritos vegetales sobre el lecho de grava proporciona un aislamiento térmico que es útil durante los meses de invierno. Las raíces de las plantas sumergidas proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos y dado que la mayoría de las macrófitas emergentes pueden transmitir oxígeno de las hojas a las raíces, se presentan microzonas aeróbicas en la superficie de las raíces y los rizomas. El resto del medio sumergido de los humedales FS tienden a carecer de oxígeno. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica del amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4 - \text{N}$) por nitrificación en los humedales FS, pero aún así el sistema es efectivo en la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios, dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas. La remoción de nitratos por desnitrificación biológica también puede ser muy efectiva dado que las condiciones anóxicas requeridas están siempre presentes y se cuenta

con suficientes fuentes de carbono. La disponibilidad limitada de oxígeno en los humedales FS disminuye la capacidad de remoción de amoníaco por nitrificación biológica. Por esta razón se requieren tiempos largos de retención en un área extensa de humedal para producir los niveles bajos de nitrógeno en el efluente con la calidad típica de afluentes de agua residual doméstica a menos que se adopten algunas modificaciones del sistema. Estos cambios han incluido la instalación de tuberías de aireación en el fondo del lecho del sistema para oxigenación mecánica, el uso de un filtro percolador integrado para la nitrificación del amoníaco en el agua residual, y lechos de humedales de flujo vertical. Estos humedales de flujo vertical normalmente contienen grava o arena gruesa y reciben cargas intermitentes desde la superficie. La aplicación intermitente del agua residual y el drenaje vertical en el lecho permiten que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez. El llenado y drenado cíclico de sistemas de flujo horizontal ha sido demostrado con éxito en el sistema de humedales FS de 130,000 galones por día de Minoa, New York. Las tasas de reacción para remoción de DBO_5 y amoníaco fueron el doble de las observadas durante el flujo normal continuo de saturación.

Los mecanismos disponibles de remoción del fósforo en todos los tipos de humedales artificiales también requieren largos periodos de retención para producir niveles bajos de fósforo a partir de agua residual doméstica típica. Los humedales FLS serían probablemente la alternativa de inversión más eficaz para humedales artificiales Si la remoción significativa del fósforo fuera un requisito para un proyecto dado. La remoción de fósforo es también posible con la adición química final y mezclando con anterioridad a una laguna profunda de sedimentación.

El nivel mínimo aceptable de tratamiento preliminar previo a un sistema de humedales FS es el equivalente al tratamiento primario. Esto

puede lograrse con tanques sépticos o tanques Imhoff para los sistemas más pequeños, o lagunas profundas con un tiempo corto de retención para los sistemas de mayor tamaño. La mayoría de los sistemas de humedales FS para tratamiento de agua residual doméstica están precedidos por lagunas facultativas o aireadas. Estas lagunas no son necesariamente el modo preferido de tratamiento preliminar. En la mayoría de estos sistemas el humedal FS se seleccionó teniendo como meta el mejorar la calidad del efluente de las lagunas. Dado que los humedales FS pueden lograr una remoción efectiva tanto de la DBO₅ como de los SST, no hay la necesidad de altos niveles de remoción de estos constituyentes en el tratamiento primario.

Los humedales FS no proporcionan el mismo nivel de hábitat que los FLS debido a que el agua en el sistema no está expuesta ni disponible para las aves y otros animales. Sin embargo, la vida silvestre se encuentra presente principalmente en forma de sitios de anidación para aves y reptiles. Si uno de los objetivos del proyecto es el proporcionar un valor de hábitat más significativo, esto puede lograrse con lagunas profundas entre-mezcladas con las celdas de humedales FS. La primera laguna estaría ubicada después del punto en el cual la calidad del agua se aproxima al menos al nivel de tratamiento secundario.

APLICABILIDAD

Los humedales FS están mejor adaptadas para aplicaciones de tamaño pequeño y mediano ($\leq 227,100$ l/d o $\leq 60,000$ galones/día) y en sistemas de mayor tamaño en los cuales se tiene un potencial significativo de contacto con el público, mosquitos o generación de olores. Su uso en sistemas de tratamiento en el punto de origen proporciona un efluente de alta calidad para la aplicación al terreno, y en algunos

estados las autoridades de permiten una reducción significativa en el terreno requerido para disposición final del efluente. Los humedales FS remueven en forma confiable la DBO, la DQO y los SST, y con tiempos de retención suficientemente largos también pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo. Los metales son también removidos eficazmente y se puede esperar también una reducción de un orden de magnitud en coliformes fecales en sistemas diseñados para producir efluentes de tratamiento secundario o avanzado.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

A continuación se enumeran algunas de las ventajas y desventajas de los humedales FS.

Ventajas

- Los humedales FS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.
- Los humedales FS pueden ser menos costosos de construir, y usualmente también son menos costosos para operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente.
- La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.
- La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante

todo el año en climas cálidos o semi-cálidos. La configuración de los humedales FS proporciona una mayor protección térmica que los humedales FLS.

- Los sistemas de humedales FS no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
- Los FS son muy efectivos en la remoción de la DBO, la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es también posible pero se requiere un tiempo de retención mucho mayor.
- Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los humedales FS mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga. También se elimina el riesgo de que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.

Desventajas

- Un humedal FS requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales FS es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al

sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.

- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH_3 y NO_3 . Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la disminución de las tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico.
- La mayoría del agua contenida en los humedales FS es anóxica, limitando el potencial de nitrificación del amoníaco del agua residual. El aumento del tamaño del humedal y el tiempo de retención puede hacerse como compensación, pero puede no ser eficiente en términos económicos. Métodos alternos de nitrificación en combinación con los humedales FS han sido utilizados con éxito. Los humedales FS no pueden ser diseñados para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos en el efluente.
- Los sistemas de humedales FS típicamente reducen al menos un orden de magnitud el contenido de coliformes fecales. Esto no es siempre suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La desinfección con luz ultravioleta ha sido utilizada con éxito en varias aplicaciones.
- Si bien los humedales FS pueden ser de menor superficie que los humedales FLS para la remoción de la mayoría de los

constituyentes del agua residual, el costo mayor del medio de grava en los humedales FS puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor a 227,000 litros por día (60,000 galones por día).

CRITERIOS DE DISEÑO

Los modelos de diseño de humedales FS han estado disponibles en publicaciones desde finales de la década de 1980. Trabajos más recientes, hechos a mediados y finales de la década de 1990 han sido compilados en tres libros de texto que presentan modelos de diseño de humedales FS (Reed, et al 1995, Kadlec & Knight 1996, Crites & Tchobanoglous, 1998). En los tres casos los modelos se basan en reacciones cinéticas de primer orden para flujo en pistón, pero los resultados no siempre concuerdan debido a las selcciones de desarrollo adoptados por cada autor, y a que no se utilizaron las mismas bases de datos para la derivación de los modelos. La organización *Water Environment Federation* (WEF) presenta una comparación de las tres metodologías en el libro *Manual de Práctica para Sistemas Naturales (Manual of Practice on Natural Systems, WEF, 2000)*, lo mismo que en el manual de diseño de sistemas de humedales de la U.S. EPA. El diseñador de sistemas de

humedales FS debe consultar esas referencias para seleccionar el método que mejor se ajuste al proyecto en consideración. Una estimación preliminar de los requerimientos de terreno para humedales FS puede obtenerse de los valores en la Tabla 1 para las tasas típicas de carga superficial. Estos valores también pueden ser utilizados para revisar los resultados de las referencias citadas anteriormente.

El tamaño de los humedales FS es determinado por el contaminante que requiere la mayor área para su remoción. Esta es la superficie del fondo de las celdas del humedal, y para que sea efectiva en un 100 por ciento, la distribución del flujo de agua residual debe ser uniforme en toda la superficie. Esto es posible con humedales artificiales mediante un gradiente de fondo cuidadosamente seleccionado y el uso de estructuras apropiadas de entrada y descarga. El área total de tratamiento debe ser dividida entre al menos dos celdas en todos los sistemas con excepción de los más pequeños. Los sistemas de mayor tamaño deben tener al menos dos trenes de tratamiento paralelos con celdas para proporcionar flexibilidad de manejo y mantenimiento.

Los sistemas de humedales son ecosistemas vivos en los cuales los ciclos de vida y muerte de la biota produce residuos que pueden ser medidos en función de DBO, SST, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales. Como resultado,

TABLA 1 TASAS TÍPICAS DE CARGA SUPERFICIAL PARA HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/L)	Meta de tratamiento del efluente (mg/L)	Tasa de carga contaminante (libras/acres-día)
Carga hidráulica (pulgadas por día)	3 a 12**		
DBO	30 a 175	10 a 30	60 a 140
SST	30 a 150	10 a 30	40 a 150
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	2 a 35	1 a 10	1 a 10
Nitrógeno como NO ₃	2 a 10	1 a 10	3 a 12
Nitrógeno total	2 a 40	1 a 10	3 a 11
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3	1 a 4

Nota: la temperatura del humedal es » 20°C.

y en forma independiente del tamaño del humedal o las características del afluente, en estos sistemas siempre existen concentraciones naturales de esos materiales. La Tabla 2 resume esas concentraciones naturales.

Es necesario que el diseñador determine la temperatura del agua en el humedal porque la remoción de DBO y de varias formas de nitrógeno, dependen de la temperatura. La temperatura del agua en sistemas con un tiempo hidráulico de retención (THR) extenso (mayor a 10 días) se acerca a la temperatura promedio del aire excepto en periodos de invierno con temperaturas bajo cero. Los métodos para calcular la temperatura del agua en humedales con THR más cortos pueden ser encontrados en las referencias publicadas que se mencionaron anteriormente.

También es necesario considerar los aspectos hidráulicos del sistema porque a lo largo del humedal existe una considerable resistencia al flujo por fricción debido a la presencia del medio de grava, las raíces de las plantas y los detritos. El mayor impacto de esta resistencia al

flujo se tiene en la configuración seleccionada para las celdas del humedal. A medida que la distancia de flujo aumenta la resistencia se hace mayor. Para evitar esos problemas hidráulicos se recomienda un cociente de longitud a ancho de 4 a 1, o menor. La ley de Darcy es aceptada generalmente como el modelo para el flujo del agua en los humedales AFS; la información descriptiva al respecto puede encontrarse también en las referencias citadas anteriormente. El flujo del agua a lo largo de las celdas del humedal depende del gradiente hidráulico en la celda, así como la conductividad hidráulica (k_s), el tamaño y la porosidad del medio utilizado (n). La Tabla 3 presenta las características típicas del medio a ser potencialmente utilizado en humedales FS. Estos valores pueden ser utilizados para estimaciones preliminares y el diseño de sistemas muy pequeños. Para sistemas a mayor escala el medio propuesto debe ser evaluado en forma experimental para determinar esos valores.

**TABLA 2 CONCENTRACIONES
“NATURALES” EN HUMEDALES
DE FLUJO SUBSUPERFICIAL**

Constituyente	Unidades	Rango de concentración
DBO ₅	mg/L	1 a 10
SST	mg/L	1 a 6
Nitrógeno total	mg/L	1 a 3
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	mg/L	menos de 0.1
Nitrógeno como NO ₃	mg/L	menos de 0.1
Fósforo total	mg/L	menos de 0.2
Coliformes fecales	NMP/100 mL	50 a 500

Fuente: Reed et al., 1995 y U.S. EPA, 1993.

DESEMPEÑO

Un humedal FS con una carga moderada puede lograr los niveles de efluente “naturales” que se presentan en la Tabla 2. En general, los humedales FS se diseñan para producir una calidad dada de efluente, y la Tabla 1 puede utilizarse para calcular en forma preliminar el tamaño requerido del humedal para producir una calidad de efluente deseada. Los modelos de diseño en las publicaciones referenciadas proveen estimaciones más precisas del área de tratamiento requerida. La Tabla 4 resume el desempeño real de 14 sistemas de humedales FS incluidos en la Evaluación de Tecnología de la U.S. EPA (EPA, 1993).

En teoría el desempeño de un sistema de humedales FS puede estar influenciado por factores hidrológicos. Tasas elevadas de evapotranspiración (ET) pueden aumentar las concentraciones del efluente pero también aumentan el THR del humedal. Tasas altas de precipitación pluvial pueden diluir la

concentración de contaminantes pero también reducir el THR del humedal. En la mayoría de las zonas templadas con un clima moderado estos efectos no son críticas para el desempeño. Estos aspectos hidráulicos solo deben ser considerados para valores extremos de ET y precipitación.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La operación y mantenimiento (O/M) rutinarios de los humedales FS son similares a los de las lagunas facultativas, e incluyen el control hidráulico y de la profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, el corte de la hierba en bermas, la inspección de la integridad de las mismas, el manejo de la vegetación del humedal y el monitoreo rutinario.

La profundidad del agua en el humedal puede requerir ajuste periódico según sea la estación o en respuesta al aumento a largo plazo de la resistencia por la acumulación de detritos en los poros del medio. El control de mosquitos puede no ser requerido en sistemas de humedales FS en la medida que la superficie del agua se mantenga debajo de la superficie superior del medio. El manejo de la vegetación en estos humedales FS no incluye la poda rutinaria y disposición del material podado. La remoción de contaminantes por parte de la vegetación es un mecanismo relativamente insignificante de manera que el corte y la remoción rutinaria de la vegetación no proporciona un beneficio significativo en cuanto al tratamiento. La remoción de detritos acumulados no es necesaria, y en climas muy fríos sirve de aislamiento térmico para prevenir la congelación del lecho del humedal. El mantenimiento de la vegetación también puede incluir el manejo de la vida silvestre dependiendo del tipo de vegetación

seleccionada para el sistema y la posición del agua. Se ha reportado que animales tales como las nutrias y el ratón almizclero pueden consumir toda la vegetación en un humedal construido. Estos animales no deberían ser atraídos a los humedales FS en la medida que se mantenga el nivel correcto del agua.

Se requiere un monitoreo rutinario de la calidad del agua en todos los humedales FS que tengan permisos de descarga del NPDES, y en este permiso se especifican los contaminantes y la frecuencia de monitoreo. El muestreo para los

TABLA 3 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DEL MEDIO DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Tipo de medio	Tamaño efectivo D ₁₀ (mm)*	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k _s (pie ³ /pie ² /d)*
Arena gruesa	2	28 a 32	300 a 3,000
Arena con grava	8	30 a 35	1,600 a 16,000
Grava fina	16	35 a 38	3,000 a 32,000
Grava mediana	32	36 a 40	32,000 a 160,000
Roca triturada	128	38 a 45	16 x 10 ⁴ a 82 x 10 ⁴

* mm x 0.03937 = pulgadas

** pie³/pie²/d x 0.3047 = m³/m²/d, o, x 7.48 = galones/pie²/d

Fuente: Reed et al., 1995

TABLA 4 RESUMEN DEL DESEMPEÑO DE 14 SISTEMAS DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL*

Constituyente	Promedio en el afluente (mg/L)	Promedio en el efluente (mg/L)
DBO ₅	28** (5 a 51)***	8** (1 a 15)***
SST	60 (23 a 118)	10 (3 a 23)
Nitrógeno como NTK	15 (5 a 22)	9 (2 a 18)
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	5 (1 a 10)	5 (2 a 10)
Nitrógeno como NO ₃	9 (1 a 18)	3 (0.1 a 13)
Nitrógeno total	20 (9 a 48)	9 (7 a 12)
Fósforo total	4 (2 a 6)	2 (0.2 a 3)
Coliformes fecales (#/100 mL)	270,000 (1,200 a 1,380,000)	57,000 (10 a 330,000)

* Valor promedio de retención de 3 días (rango de 1 a 5 días).

** Valor promedio.

*** Rango de valores.

Fuente: U.S. EPA, 1993.

permisos de NPDES está limitado normalmente al agua residual no tratada y al efluente final del sistema. Dado que el componente de humedales normalmente está precedido por alguna forma de pretratamiento, el programa de monitoreo del NPDES no documenta las características del afluente a los humedales. Se recomienda que en todos los sistemas, excepto los de menor tamaño, se recolecten y analicen en forma periódica, muestras del afluente con fines operacionales además de las requeridas por el permiso NPDES. Esto permitirá que el operador tenga un mejor entendimiento del desempeño del humedal y le proporcione la base para hacer ajustes de ser necesarios.

COSTOS

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales FS son similares a muchos de los requeridos para los sistemas de lagunas. Estos incluyen el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del sitio, la movilización de suelos, el recubrimiento, el medio de grava, las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías misceláneas, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, y los gastos fijos y ganancia del contratista. El medio de grava y el recubrimiento pueden ser los elementos más

costosos de esta lista. En los estados del Golfo de México en donde los suelos arcillosos a menudo eliminan la necesidad del recubrimiento, el costo de traer la grava puede representar el 50 por ciento del costo de construcción. En otras localidades en donde la grava está disponible localmente pero se requiere una membrana de recubrimiento, el costo de esta puede ser cerca del 40 por ciento del costo de construcción. En muchos casos la compactación en el sitio de los suelos naturales proporciona una barrera suficiente para prevenir la contaminación del agua freática. La Tabla 5 presenta los costos para construcción de un humedal FS hipotético de 378,500 l/d (100,000 galones/d) para lograr una concentración de 2 mg/L de amoníaco en el efluente. Otros supuestos de cálculo son los siguientes: NH₃ afluente = 25 mg/L, temperatura del agua 20°C (68°F), profundidad del medio = 0.6 m (2 pies), porosidad = 0.4, área de tratamiento = 1.3 hectáreas (3.2 acres), costo del terreno = \$12,355/hectárea (\$5,000/acre).

La Tabla 6 presenta una comparación del costo del ciclo de vida útil de este humedal con el costo de sistemas convencionales de tratamiento diseñados para el mismo caudal y calidad de efluente. El proceso convencional es un reactor secuencial por tandas (SBR).

TABLA 5 COSTOS DE INVERSIÓN Y DE O/M PARA UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL CON UNA CAPACIDAD DE 100,000 GALONES POR DÍA

Elemento	Costo, \$*	
	Recubrimiento de suelo natural	Recubrimiento de membrana plástica
Costo del terreno	\$16,000	\$16,000
Evaluación del sitio	3,600	3,600
Limpieza del sitio	6,600	6,600
Movimiento de tierra	33,000	33,000
Recubrimiento	0	66,000
Medio de grava**	142,100	142,100
Plantas	5,000	5,000
Sembrado	6,600	6,600
Estructuras de entrada y descarga	<u>16,600</u>	<u>16,600</u>
Subtotal	\$229,500	\$295,500
Costos de ingeniería, legales, etc.	<u>\$133,000</u>	<u>\$171,200</u>
Costo total de inversión	\$362,500	\$466,700
Costos de O/M, \$/año	\$6,000/año	\$6,000/año

* Costos de junio de 1999, índice ENR de construcción = 6039

** 12,000 yardas cúbicas de grava de 0.75 pulgadas

TABLA 6 COMPARACIÓN DE COSTOS DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL Y UN SISTEMA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Elemento de costo	Proceso	
	Humedal	SBR
Costo de inversión	\$466,700	\$1,104,500
Costo de O/M	\$6,000/año	\$106,600/año
Costo total a valor presente*	\$530,300	\$2,233,400
Costo por 1000 galones de agua tratada**	\$0.73	\$3.06

* El factor de valor presente es de 10.594 con base en un periodo de 20 años y 7 por ciento de interés (costos de junio de 1999 con un índice ENR de construcción = 6039).

** El caudal diario para 365 días por año por 20 años, dividido por 1000 galones.

Fuente: WEF, 2000.

REFERENCIAS

Second Edition, McGraw Hill Co, New York, New York.

Otros folletos informativos relacionados:

Humedales de Flujo Libre Superficial
EPA 832-F-00-024
Septiembre del 2000

Otros folletos informativos de la EPA se pueden obtener en la siguiente dirección de Internet:
<http://www.epa.gov/owmitnet/mtbfact.htm>

1. Crites, R.W., G. Tchobanoglous (1998) *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw Hill Co., New York, New York.
2. Kadlec, R.H., R. Knight (1996) *Treatment Wetlands*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
3. Reed, S.C., R.W. Crites, E.J. Middlebrooks (1995) *Natural Systems for Waste Management and Treatment* –

4. U.S. EPA (1999) *Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment*, US EPA, OWM, Washington, DC. (in press.)
5. U.S. EPA (2000) *Design Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment*, US EPA CERL, Cincinnati, Ohio (in press.)
6. US. EPA (1993) *Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment*, EPA 832-R-93-008, US EPA OWM, Washington, DC.
7. Water Environment Federation (2000) *Natural Systems for Wastewater Treatment*, MOP FD-16, WEF, Alexandria, Virginia (in press.)

INFORMACION ADICIONAL

Southwest Wetlands Group
Mr Michael Ogden
901 W. San Mateo, Suite M,
Santa Fe, NM 87505

City of Mandeville
Mr Joe Mistich, Public Works Director
3101 E. Causway Approach
Mandeville, LA 70448-3592

TVA
Mr James Watson
311 Broad Street, HB 25 270C – C
Chattanooga, TN 37402-2801

EMC Group, Inc.
Mr Charles King
PO Box 22503
Jackson, MS 39205

Village of Minoa WWTP
Mr Steve Giarrusso
213 Osborne Street
Minoa, NY 13116

La mención de marcas registradas o productos comerciales no significa la aprobación ni recomendación por parte de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

Para más información contáctese con:

Municipal Technology Branch
U.S. EPA
Mail Code 4204
1200 Pennsylvania Avenue, NW
Washington, D.C., 20460

