CAPÍTULO 4

4. SISTEMAS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

4.1. Introducción

La depuración de las aguas residuales urbanas, industriales, lluvias y agrícolas es uno de los retos ecológicos más importantes hoy en día. La denominada "fitodepuración" aprovecha la capacidad de reducir o eliminar contaminantes de algunas plantas presentes en los humedales, por medio de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. En el capítulo anterior reseñamos las generalidades de este tipo de sistema de tratamiento, en el presente describiremos con detalle por ser objeto del presente trabajo el diseño de un sistema de humedal de flujo libre.

Existen una serie de plantas acuáticas que ejercen una depuración directa de sustancias contaminantes, como nitratos y fosfatos, o microorganismos patógenos. Los carrizos, juncos, eneas o esparganios son plantas acuáticas de los humedales capaces de degradar la materia orgánica del entorno. En este sentido, actúan a manera de filtro, como sumidero de sedimentos y precipitados, y como motor biogeoquímico que recicla y transforma nutrientes.

No obstante, a pesar de su poder depurador, los expertos no aconsejan el tratamiento de aguas residuales mediante *humedales naturales*, debido a su grave impacto medioambiental y a la posibilidad de contaminar los acuíferos y ecosistemas circundantes. Por ello, los científicos han desarrollado humedales artificiales, que reproducen el ecosistema de un humedal natural pero acelerando los procesos físicos, químicos y biológicos para el tratamiento de las aguas residuales.

Los *humedales artificiales* suelen consistir en estanques o canales de poca profundidad, normalmente de menos de un metro, donde se ubican las especies vegetales acuáticas encargadas de los procesos naturales de depuración. Estas instalaciones cuentan además con canalizaciones y sistemas de aislamiento del suelo para no contaminar los ecosistemas adyacentes.

Las ventajas de los humedales artificiales son diversas, entre las cuales se pueden citar: Integración en el medio ambiente de manera natural, por lo que su impacto visual es bajo; capacidad depuradora eficaz de aguas residuales con contaminación principalmente orgánica; así como costos bajos y un mantenimiento sencillo. Su uso es especialmente adecuado para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones, que suelen ofrecer un bajo costo del terreno y mano de obra poco tecnificada. Así mismo, el aumento de estos sistemas naturales de depuración puede dar lugar a una importante actividad agrícola futura, basada en el desarrollo de cultivos específicos de este tipo de plantas.

No obstante, los humedales artificiales también cuentan con una serie de limitaciones, como la necesidad de amplias superficies de terreno, y otras que serán abordadas mas adelante.

Los humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y/o tipo de vegetación presente. La mayoría de los humedales naturales son sistemas de flujo 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).

4.2. Componentes del Humedal.

En un diseño correcto de un humedal deben tenerse en cuenta ciertos aspectos importantes como el agua, substrato y plantas emergentes, los microorganismos e invertebrados acuáticos se desarrollan de manera natural. A continuación se citan los componentes de los humedales con sus características:

4.2.1. Agua.

Lo más probable es que se formen humedales en donde exista acumulación de agua directamente sobre el terreno y en donde exista una capa del subsuelo que sea relativamente impermeable para evitar la filtración.

La hidrología es uno de los factores mas importantes en un humedal ya que reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en el éxito o fracaso del mismo.[9] La hidrología de un humedal construido no es muy diferente que la de otras aguas superficiales, sin embargo difiere en aspectos relevantes como por ejemplo, pequeños cambios en la hidrología pueden tener importancia en la efectividad del tratamiento, debido al área superficial del agua y su poca

---

9

profundidad, el sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera através de la lluvia y la evapotranspiración (pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie del agua y através de la transpiración de las plantas), la densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua através de la red de tallos, hojas, raíces y rizomas, y luego bloqueando la exposición al viento y el sol.

4.2.2. Substrato.

Los substratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como el compost. Sedimentos y restos de vegetación se acumulan en el humedal debido a la baja velocidad del agua y a la alta productividad típica de estos sistemas, el substrato, sedimentos y restos de la vegetación son importantes por varias razones:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del substrato afecta el movimiento del agua através del humedal.
- El substrato sirve para que muchos contaminantes sean almacenados.

- Transformaciones químicas y biológicas (microbianas) tienen lugar dentro del substrato.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, la fijación de microorganismos, y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

Las características físicas y químicas del suelo y otros substratos se alteran cuando se inundan. En un substrato saturado, el agua reemplaza los gases atmosféricos en los poros y el metabolismo microbiano consume el oxígeno disponible y aunque se presenta dilución de oxígeno de la atmósfera, puede darse lugar a la formación de un substrato anóxico, lo cual será importante para la remoción de contaminantes como el nitrógeno y metales.[10]

4.2.3. Vegetación.

El principal beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema

9

(tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión.

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de aguas bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos de traza, y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del substrato.[11]
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

9

Las plantas emergentes que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales incluyen espadañas, carrizos, juncos (juncos de laguna). De igual forma existen algunos sistemas con carrizos, siendo esta especie la dominante en los humedales artificiales que se encuentran en Europa. Cuando se diseñan sistemas que específicamente buscan un aumento en el hábitat, además de conseguir el tratamiento del agua residual, usualmente incluyen una gran variedad de plantas, especialmente para proporcionar alimentación y nido a las aves y otras formas de vida acuática.

La espadaña (typha) es robusta, capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales, y se propaga fácilmente, por lo que representa una especie de planta ideal para un humedal artificial. También, es capaz de producir biomasa anual grande y tiene un potencial pequeño de remoción de Nitrógeno y Fósforo por la vía de la poda y la cosecha. Los rizomas de espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 60cm. pueden producir una cubierta densa en menos de un año, tiene una relativamente baja penetración en grava de 30cm. por lo que no es recomendable para sistemas de flujo subsuperficial.

En las figuras 4.1 y 4.2 se aprecian este tipo de plantas (espadañas).

Figura. 4.1

Fuente: Ingeniero Jaime Andrés Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tésis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.

Figura.4.2

Fuente: Ingeniero Jaime Andrés Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tésis De Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999

Los juncos (scirpus) pertenecen a la familia de las ciperáceas, son perennes y crecen en grupos. Son plantas que crecen en un rango diverso de aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Los juncos son capaces de crecer bien en agua desde 5cm a 3m de profundidad, las temperaturas deseables son entre 16º a 27ºC. Se encuentran juncos creciendo en un pH de 4 a 9, la mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en alrededor de un año con separaciones de 30cm. Algunas variedades crecen más rápido y pueden cubrir en un año con un espaciamiento algo menor (entre 30cm. y 60 cm.). Existen algunas variedades de scirpus, en las figuras 4.3 y 4.4 se mostrarán 2 tipos:

Figura. 4.3
Fuente: Ingeniero Jaime Andrés Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tésis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999

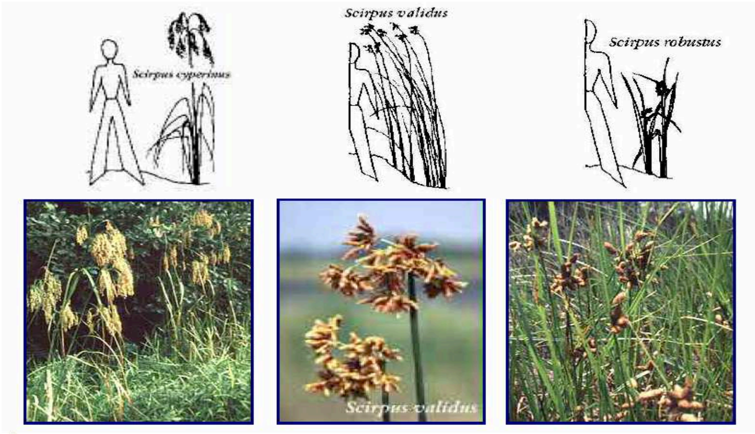

Figura. 4.4

Fuente: Ingeniero Jaime Andrés Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tésis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999

Las phragmites son plantas anuales y altas con un rizoma perenne extenso, logran un muy buen cubrimiento en un año con separación de 60cm. En Europa se han usado carrizos y han sido plantas acuáticas emergentes más extendidas. Los sistemas que utilizan carrizos pueden ser más eficaces en la transferencia de oxígeno porque los rizomas penetran verticalmente, y más profundamente que los de las espadañas, aunque menos que los juncos que es aproximadamente 40cm. Los carrizos muy usados para humedales artificiales porque presentan la ventaja de que tienen un bajo valor alimenticio, y por tanto, no se ven atacadas por animales como otros tipos de plantas. En las figuras 4.5 y 4.6 se aprecian este tipo de plantas:

Figura. 4.5

Fuente: Ingeniero Jaime Andrés Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tésis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999

Figura. 4.6

Fuente: Ingeniero Jaime Andrés Lara Borrero, Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tésis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999

En la tabla 4.1 se muestra información sobre parámetros medioambientales de algunas de estas plantas:

Familia	Nombre latino	Nombres comunes más usuales	Temperatura, °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	*Carex sp.*	-	14-32			5-7,5
	Eleocharis sp.	-				
	Scirpus lacustris L.(*)	Junco de laguna	18-27		20	4-9
Gramíneas	*Glyceria fluitans (L.) R. Br.*	Hierba del maná				
	Phragmites australis (Cav) Trin. ex Steudel (*)	Carrizo	12-23	10-30	45	2-8
Iridáceas	*Iris pseudacorus L.*	Lirio amarillo, espadaña fina				
Juncáceas	*Juncus sp.*	Juncos	16-26		20	5-7,5
Tifáceas	*Thypha sp (*).*	Eneas, aneas, espadañas.	10-30	12-24	30	4-10

(*)Especie más utilizada entre todas

Tabla 4.1. Parámetros medioambientales de las plantas típicas usadas en los humedales

Fuente: George Tchobanoglous, Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y decentralizados, 2000.

4.2.4. Microorganismos.

Una de las principales características de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

La actividad microbiana transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles, altera las condiciones de potencial redox del substrato y así afecta la capacidad del proceso del humedal, además esta actividad está involucrada en el reciclaje de nutrientes. Algunas transformaciones microbianas requieren oxígeno libre (aeróbicas) y otras no requieren oxígeno libre (anaeróbicas). Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando [12]se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan, inclusive durante años. La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, y debe tenerse cuidado para prevenir que tales

9

sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

4.2.5. Animales.

Los humedales construidos proveen un hábitat para una rica diversidad de invertebrados y vertebrados. Los invertebrados como insectos y gusanos, contribuyen al proceso de tratamiento fragmentado el detritus al consumir materia orgánica. Las larvas de muchos insectos son acuáticas y consumen cantidades significativas de materia durante sus fases larvales.

Aunque los invertebrados son los animales más importantes en cuanto a la mejora de la calidad del agua, los humedales construidos también atraen a una gran variedad de anfibios, tortugas y mamíferos. Los humedales construidos atraen también variedad de pájaros e incluso patos silvestres.

4.3. Tipos de Humedales artificiales.

Básicamente se diferencian 2 tipos básicos de humedales artificiales, según el tipo de planta y la localización de su sistema radicular (el conjunto de las raíces): Enraizadas en el suelo del humedal (sistemas de flujo superficial) o en lechos de grava o arena por los que se hace circular el agua residual (sistema subsuperficial). A continuación se definirá de manera más detallada el concepto y funcionamiento de cada uno, así como también sus respectivas ventajas y desventajas.

4.3.1. Humedales de Flujo Libre.

Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial (HAFL) aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas HAFL. La observación de la mejora en la calidad del agua en humedales naturales llevó al desarrollo de humedales artificiales para tratar de reproducir en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat. La mayoría de los humedales artificiales HAFL son praderas inundadas, pero se tienen también algunos ejemplos de fangales y zonas pantanosas. En los humedales HAFL el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. En algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal. Un diagrama de un humedal HAFL se presenta en la Figura 4.7.

Existen pocos ejemplos del uso de humedales naturales para tratamiento de aguas residuales en los Estados Unidos. Dado que toda descarga a humedales naturales debe cumplir con los requisitos del permiso de descarga del Sistema Nacional de Eliminación de Descarga de Contaminantes (National Pollutant Discharge Elimination System, NPDES), estos humedales se usan normalmente para tratamiento avanzado o refinamiento terciario. Las metas de diseño de los humedales construidos van desde un uso dedicado exclusivamente a las funciones básicas de tratamiento hasta sistemas que proporcionan tratamiento avanzado y/o en combinación con mejoras del hábitat de la vida silvestre y oportunidades para la recreación pública.

El tamaño de los sistemas de humedales HAFL va de pequeñas unidades para tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta grandes unidades de más de 16,888 hectáreas (40,000 acres). En la actualidad un extenso sistema es utilizado para tratar el fósforo en escorrentía pluvial agrícola en Florida.

Los humedales en operación en los Estados Unidos diseñados para el tratamiento de aguas residuales tienen un rango de menos de 3,785 litros por día (1,000 galones por día) hasta más de 75,708 m3/d (20 millones de galones por día).

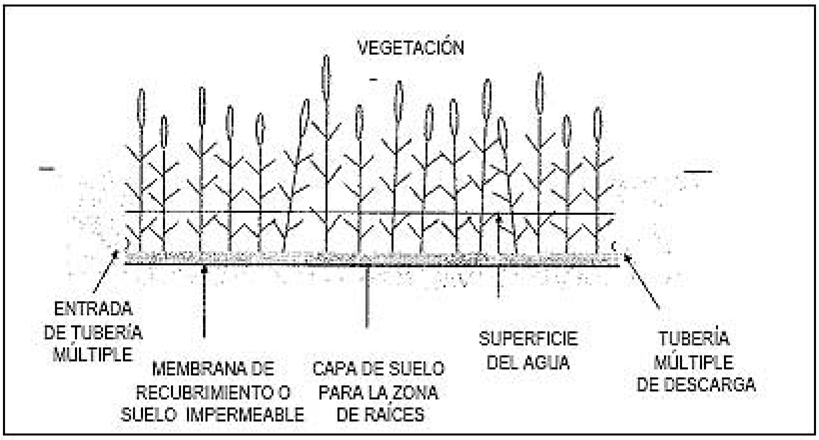

Figura 4.7. Humedal de Flujo Libre Superficial

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

Los humedales artificiales HAFL consisten normalmente de una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FSL incluye las espadañas y aneas (Typha spp.), los juncos (Scirpus spp.) y los carrizos (Phragmites spp.). En sistemas diseñados principalmente para tratamiento, es común que sólo se seleccionen una o dos especies para la siembra. La cubierta vegetal producida por la vegetación emergente da sombra a la superficie del agua, previene el crecimiento de algas y reduce la turbulencia inducida por el viento en el agua que fluye por el sistema. Quizás aún más importante son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los ramales erguidos de las plantas muertas, y los detritos acumulados del crecimiento vegetal previo. Estas superficies sumergidas proporcionan el sustrato físico para el crecimiento de organismos adheridos que son responsables por la mayoría del tratamiento biológico en el sistema. La profundidad del agua en las porciones con vegetación de estos sistemas va desde unas pocas pulgadas hasta más de dos pies.

El afluente a estos humedales se distribuye sobre un área extensa de agua somera y vegetación emergente. La lenta velocidad que se produce y el flujo esencialmente laminar proporcionan una remoción muy efectiva del material particulado en la sección inicial del sistema. Este material particulado, caracterizado como sólidos suspendidos totales (SST), contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO), distintos arreglos de nitrógeno total y fósforo total, trazas de metales y compuestos orgánicos más complejos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO, nitrógeno total y fósforo total al medio ambiente del humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales activas a lo largo del humedal. El oxígeno está disponible en la superficie del agua, en microzonas de la superficie de plantas vivas y en superficies de raíces y rizomas, lo cual permite que se produzca actividad aeróbica en el humedal. Se puede asumir, sin embargo, que la mayor parte del líquido en el humedal HAFL es anóxico o anaeróbico. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica por nitrificación del amoníaco (NH3/NH4 - N) , pero los humedales HAFL sí son efectivos en cuanto a la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas.

Si la remoción de nitrógeno y/o la mejora de hábitat de vida silvestre son un objetivo del proyecto, debe considerarse el alternar zonas someras con vegetación emergente con zonas más profundas (más de 1.83 m o dos pies) que contengan vegetación sumergida seleccionada. Las zonas de mayor profundidad proporcionan una superficie de agua expuesta a la atmósfera para la reaireación, y la vegetación sumergida proporciona oxígeno para la nitrificación. Las zonas más profundas también atraen y retienen una gran variedad de vida silvestre, en particular patos y otras aves acuáticas. Este concepto, utilizado en Arcata, California, y en Minot, North Dakota, puede proporcionar un tratamiento excelente durante todo el año en climas cálidos, y en forma estacional en climas más fríos en los cuales se presentan bajas temperaturas y formación de hielo. El tiempo hidráulico de retención (THR) en cada una de estas zonas de superficie del agua expuesta debe limitarse a aproximadamente tres días para prevenir la re-emergencia de las algas.

Estos sistemas siempre deben iniciarse y terminar con zonas someras de vegetación emergente para asegurar la retención y el tratamiento de material particulado y para minimizar la toxicidad a la vida silvestre en las zonas de agua expuestas. El uso de humedales construidos HAFL ha aumentado significativamente desde finales de la década de 1980. Estos sistemas se encuentran distribuidos extensamente en los Estados Unidos y se encuentran en cerca de 32 estados.

En los Estados Unidos es rutinario el proporcionar algún tipo de tratamiento preliminar antes del humedal HAFL. El nivel mínimo aceptable es el equivalente al tratamiento primario, el cual puede lograrse con tanques sépticos, tanques Imhoff para sistemas de tamaño pequeño, o con lagunas profundas con un tiempo corto de retención. Cerca del 45 por ciento de los sistemas de humedales HAFL en operación usan lagunas facultativas como tratamiento preliminar, pero los humedales han sido también utilizados como continuación de otros sistemas de tratamiento.

Sistemas de humedales HAFL de retención completa del agua, sin descarga han sido usados en zonas áridas de los Estados Unidos en donde el agua se pierde completamente por la combinación de la percolación y la evapotranspiración. En estos sistemas se debe prestar atención a la acumulación a largo plazo de sales y otras substancias que pueden convertirse en tóxicas para la vida silvestre o las plantas en el sistema. Mientras que es imposible excluir la vida silvestre de los humedales HAFL, es prudente el minimizar su presencia hasta cuando la calidad del agua sea cercana al nivel de tratamiento secundario. Esto puede lograrse limitando las zonas de agua expuesta en el trayecto final del sistema y usando masas densas de vegetación emergente en la porción inicial del humedal. El seleccionar vegetación con poco valor alimenticio para los animales o las aves también puede ser útil. En los climas más fríos, o en donde no se cuenta con áreas extensas, se pueden diseñar sistemas de humedales de menor tamaño para la remoción de DBO y SST.

Los humedales HAFL requieren un área relativamente extensa, especialmente si se requiere la remoción del nitrógeno o el fósforo. El tratamiento es efectivo y requiere muy poco en cuanto a equipos mecánicos, electricidad o la atención de operadores adiestrados. Los sistemas de humedales pueden ser los más favorables desde el punto de vista económico cuando el terreno está disponible a un costo razonable. Los requerimientos de terreno y los costos tienden a favorecer la aplicación de la tecnología de humedales HAFL en áreas rurales.

Los sistemas de humedales HAFL remueven en forma confiable la DBO, la demanda química de oxígeno (DQO) y los SST.

También pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo con tiempos de retención suficientemente largos, los metales son también removidos eficazmente y se puede esperar también una reducción de un orden de magnitud en coliformes fecales. Además de las aguas residuales domésticas, los sistemas de HAFL son usados para tratamiento del drenaje de minas, escorrentía pluvial urbana, desbordes de drenajes combinados, escorrentía agrícola, desechos ganaderos, avícolas y lixiviados de rellenos sanitarios, y para efectos de mitigación.

Mecanismos de Remoción.

En los humedales artificiales de flujo libre se puede esperar una alta remoción de DBO y SST, junto con una remoción significativa de nitrógeno, metales, compuestos orgánicos traza y organismos patógenos. El grado de remoción depende por lo general del tiempo de retención y de la temperatura. Los mecanismos de remoción en operación se describen a continuación:

Remoción de DBO: La DBO soluble y particulada se remueve por medio de la actividad biológica y la adsorción sobre la superficie de las plantas y de los detritos en la columna de agua. Las velocidades bajas y las plantas emergentes facilitan la floculación y sedimentación de la DBO particulada. Los sólidos orgánicos removidos por sedimentación y filtración ejercerán una demanda de oxígeno tal como lo hace la vegetación que decae. La remoción de DBO es por lo general del 60 al 80%.

Remoción de sólidos suspendidos totales (SST): Los principales mecanismos para la remoción de SST son la floculación y la sedimentación en el seno del líquido y la filtración en los intersticios de los detritos. La mayoría de los sólidos sedimentables se retiran dentro de los primeros 50 a 100 pies de la entrada.

La remoción óptima de los SST requiere lugares llenos de vegetación para facilitar la filtración, y así evitar que las algas crezcan de nuevo, las mismas que pueden tomar entre 6 a 10 días de tiempo de retención para ser eliminadas.

En la tabla 4.2 se pueden ver las remociones habituales de SST en este tipo de humedales.

	DBO , mg/L		SST , mg/L	
Ubicación	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Arcata, California	26	12	30	14
Benton, Kentucky	25,6	9,7	57,4	10,7
Cannon Beach, Oregon	26,8	5,4	45,2	8
Ft. Deposit, Alabama	32,8	6,9	91,2	12,6
Gustine, California	75	19	102	31
Iselin, Pensilvania	140	17	380	53
Listowel, Ontario	56,3	9,6	111	8
Ouray, Colorado	63	11	86	14
West Jackson Co., Mississipi	25,9	7,4	40,4	14,1

Tabla 4.2. Remociones típicas de SST en Humedales de Flujo Libre

Fuente: George Tchobanoglous, Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y decentralizados, 2000.

Remoción de nitrógeno: La remoción de nitrógeno se logra por medio de la nitrificación y la denitrificación. La asimilación de éste por parte de las plantas solo explica cerca del 10% de la remoción.

La nitrificación y la denitrificación son reacciones microbianas que dependen de la temperatura y del tiempo de retención. Los organismos nitrificantes necesitan oxígeno y una superficie adecuada para crecer, por esto no se encuentran presentes en cantidades significativas en los sistemas muy cargados (carga de DBO>100 lb/ac-día) o en sistemas recién construidos con cubrimiento vegetal incompleto. Sobre la base de la experiencia en el campo con este tipo de humedales, se necesitarían una o dos estaciones de crecimiento para desarrollar suficiente vegetación que soporte la nitrificación microbiana. La denitrificación requiere una cantidad adecuada de materia orgánica para convertir el nitrato a nitrógeno gaseoso, si las aguas residuales nitrificadas se aplican a este tipo de humedales, los nitratos se desnitrificarán con pocos días de retención.

La remoción de nitrógeno está limitada por la habilidad del sistema para llevar a cabo la nitrificación. Cuando el nitrógeno está presente en forma de nitrato, la remoción de nitrógeno es en general rápida y completa.

La remoción de nitrato depende de la concentración del mismo, del tiempo de retención y de la disponibilidad de materia orgánica. Dado que la columna de agua es prácticamente anóxica en muchos de los humedales de tratamiento de aguas residuales municipales, la reducción del nitrato ocurrirá en pocos días.

En la tabla 4.3 se muestran las remociones habituales de nitrógeno para humedales de flujo libre en ciertos lugares de los Estados Unidos.

Ubicación	Tipo de Efluente	DBO , mg/L		SST , mg/L	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
Arcata, Californial	Laguna de Oxidación	12,8	10		11,6
Iselin, Pensilvania	Laguna de Oxidación	30	13		
Jackson Bottoms, Oregon	Secuandario	9,9	3,1		11,6
Listowel, Ontario	Primario	8,6	6,1	19,1	8,9
Pembroke, Kentuchy	Secuandario	13,8	3,35		11,6
Sacramento, California	Secuandario	14,1	7,2	16,8	9,1

Tabla 4.3. Remociones típicas de N en Humedales de Flujo Libre en EE.UU.

Fuente: George Tchobanoglous, Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y decentralizados, 2000.

Remoción de fósforo: Los mecanismos principales para la remoción de fósforo en los sistemas de flujo libre son la adsorción, la precipitación química y la asimilación por parte de las plantas, la cual es rápida. Sin embargo, a medida que las plantas mueren**,** liberan fósforo, de manera que a largo plazo la remoción es baja. La remoción del fósforo depende de la interacción del suelo y del tiempo de retención. En sistemas con cero descargas o tiempos de retención, el fósforo será retenido en el suelo o en las zonas de las raíces. En el flujo através de los humedales con tiempos de retención entre 5 a 10 días, la remoción del fósforo excederá rara vez 1 a 3mg/l. Dependiendo de las condiciones ambientales dentro del humedal, el fósforo, así como otros constituyentes, puede liberarse durante ciertas épocas del año, generalmente en respuesta a las condiciones que se han modificado dentro del sistema, tales con el cambio en el potencial de oxido reducción.

Remoción de metales: Se espera que la remoción de los metales pesados sea muy parecida a la del fósforo, aunque actualmente hay pocos datos disponibles de estos mecanismos de remoción. Entre estos mecanismos están la absorción, sedimentación, precipitación química y asimilación vegetal. Así como con el fósforo, los metales pueden ser liberados durante ciertas épocas del año, por lo general debido a cambios en el potencial de oxido reducción dentro del sistema.[13]

Remoción de constituyentes orgánicos traza: Aunque la disponibilidad de datos es muy limitada, en este tipo de humedales se han reportados remociones del 88 al 99%, entre los mecanismos de remoción se incluyen la volatilización, la adsorción y la biodegradación.

Remoción de organismos patógenos: Las bacterias patógenas y los virus se remueven de los humedales artificiales por absorción, sedimentación, predación y muerte debido a la

5

exposición a los rayos ultravioleta de la luz solar y a temperaturas poco favorables. Se han reportado remociones de coliformes fecales de hasta el 99% en ciertos lugares. En la tabla 4.4 se muestra la remoción de coliformes fecales de algunos humedales de flujo libre.

Ubicación	Unidad	Afluente	Efluente	Tiempo de retención, d
Iselin, Pensilvania; eneas y pastos				
Estación de invierno	No./ 100mL	1,7x10	4,3x10	6
Estación de verano	No./ 100mL	1,0x10	723	6
Arcata, California; juncos				
Estación de invierno	No./ 100mL	4,3x10	900	1,9
Estación de verano	No./ 100mL	1,8x10	80	1,9
Listowel, Ontario; eneas				
Estación de invierno	No./ 100mL	5,56x10	1,4x10	7 a 14
Estación de verano	No./ 100mL	1,98x19	400	7 a 14

Tabla 4.4. Remoción de coliformes fecales en HAFL

Fuente: George Tchobanoglous, Sistema de manejo de Aguas Residuales para núcleos pequeños y decentralizados, 2000.

Ventajas.-Entre las principales ventajas de los humedales de *flujo libre superficial* (HAFL) tenemos las siguientes:

- Los humedales HAFL proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados.
- Los humedales HAFL pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento.

- 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 semicálidos.
- Los sistemas de humedales proporcionan una adición valiosa al "espacio verde" de la comunidad, e incluye la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para recreación pública.
- Los sistemas de humedales HAFL no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.

La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.

Desventajas.-Entre las principales desventajas de los humedales de *flujo libre superficial* (HAFL) tenemos las siguientes:

- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales son procesos biológicos y son esencialmente continuos y renovables. 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.
- Las necesidades de terreno de los humedales HAFL pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo.
- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación. Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la reducción en esas 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, este problema no existirá en este caso debido a la localización del proyecto donde se haya un clima cálido.
- La mayoría del agua contenida en los humedales artificiales HAFL es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco. El aumento del tamaño del humedal, y consecuentemente, el tiempo de retención puede

hacerse en forma compensatoria, pero puede no ser eficiente en términos económicos.

- Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.
- La población de aves en un humedal HAFL puede tener efectos adversos si un aeropuerto se encuentra localizado en la vecindad.

Los humedales artificiales HAFL pueden remover coliformes fecales del agua residual municipal, al menos en un orden de magnitud. Esto no siempre es suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. La situación puede complicarse aun más debido a que las aves y otras especies de vida silvestre producen coliformes fecales.

4.3.2. Humedales de Flujo Subsuperficial.

Un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFS) 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 este tipo de humedal se muestra en la Figura 4.8. La grava es el medio más utilizado tanto en los Estados Unidos como en Europa, aunque también se ha utilizado roca triturada, arena y otro tipo de materiales del suelo.

El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las [14]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.

6

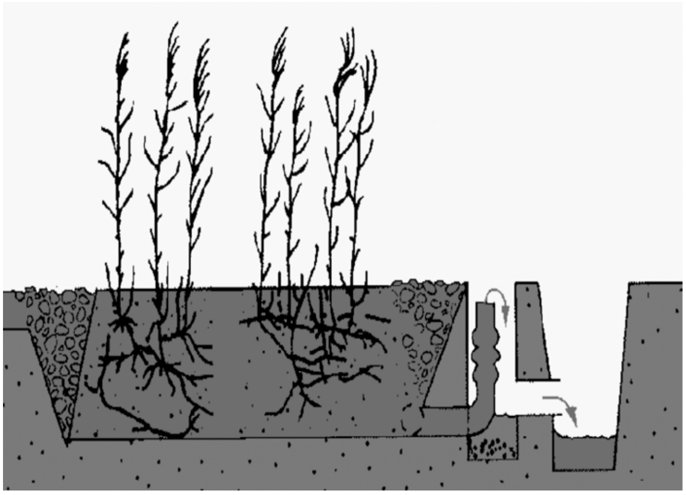

Figura. 4.8. Esquema típico de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial

Fuente: Enviromental Protection Agency *EPA*, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Humedal de flujo libre subsuperficial, 2000

La mejora en 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 de flujo libre superficial esos sustratos son las proporciones sumergidas de las plantas vivas, los detritos vegetales, y la capa béntica del suelo.

En humedales de flujo subsuperficial el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas y la superficie misma del medio. Dado que el área de sustrato en un humedal de flujo subsuperficial puede sobrepasar por mucho el sustrato disponible en humedales de flujo libre, las tasas de reacción microbiana también pueden ser mayores en humedales de flujo subsuperficial.

Las metas de diseño de este tipo de humedales son exclusivamente las de tratamiento porque la posibilidad del proporcionar hábitat de vida silvestre y recreación pública es muy limitada. 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 con una capacidad de aproximadamente 4 millones de galones al día, mgd (Louisiana, US). La mayoría de los sistemas municipales están precedidos por lagunas de tratamiento aireadas o facultativas. El caudal de sistemas pequeños para el tratamiento de aguas residuales, como para colegios, viviendas, locales comerciales, entre otros, va de cientos de galones por día a miles de galones por día; el tipo predominante de pretratamiento proporcionado es el de tanque sépticos. Los costos del medio de roca o de grava son más altos y hacen que el uso de sistemas de humedales de este tipo sea alto en relación a los de flujo libre superficial.

Los sistemas de flujo subsuperficial también reciben en Estados Unidos el nombre de rock-reed filtres, microbial rock plant filtres, vegetated submerged beds, marsh beds, tule beds e hydrobotanical systems. En Alemania, un tipo similar que utiliza suelo nativo y juncos se conoce como el método de la *zona de raíces*. Los sistemas de flujo subsuperficial tienen la ventaja de que necesitan áreas de tierra menores y evitan los problemas de olores y mosquitos como se mencionó anteriormente.

Los humedales de flujo subsuperficial ocupan menos espacio y generalmente tienen pendientes que varían de 0 a 0.5%. Si los suelos son permeables, puede ser necesario instalar un recubrimiento por debajo del lecho del medio. El tamaño de la grava oscila entre 0.12 y 1.25 pulgadas, y en la zona de la entrada es de 2 pulgadas de largo. La zona de entrada debe tener un medio con el diámetro más grande para disminuir el potencial de obstrucción.

Los humedales de flujo subsuperficial 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 PEAD).

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 tiene un rango de 30 a 90 cm., siendo el valor más común el de 60cm.

Los humedales están mejor adaptados para aplicaciones de tamaño pequeño y mediano (<227000 lt/día) y en sistemas de mayor tamaño en los cuales se tiene un potencial significativo de contacto con el público. 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 permiten una reducción significativa en el terreno requerido para disposición final del efluente. Este tipo de humedales remueven en forma confiable la DBO, 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.

Los modelos de diseño de humedales de *flujo subsuperficial* han estado disponibles en publicaciones desde finales de la década del 80. Trabajos más recientes, hechos a mediados y finales del 90 se basan en reacciones cinéticas de primer orden para flujo en pistón. En la Tabla 4.5 se puede observar valores típicos para las tasas de carga superficial.

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 NH3/NH4	2 a 35	1 a 10	1 a 10
Nitrógeno como NO3	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

Tabla 4.5. Tasas de carga superficial en Humedales de Flujo subsuperficial
Fuente: Reed et al., 1995 y U.S. EPA, 1993.

El tamaño de los humedales de flujo subsuperficial 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%, la distribución del flujo del agua residual debe ser uniforme en toda a 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, 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 4.6 resume esas concentraciones naturales.

Constituyente	Unidades	Rango de concentración
DBO5	mg/L	1 a 10
SST	mg/L	1 a 6
Nitrógeno total	mg/L	1 a 3
Nitrógeno como NH3/NH4	mg/L	menos de 0.1
Nitrógeno como NO3	mg/L	menos de 0.1
Fósforo total	mg/L	menos de 0.2
Coliformes fecales	NMP/100 mL	50 a 500

Tabla 4.6. Concentraciones naturales en Humedales de Flujo Subsuperficial

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

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 extenso (mayor a 10 días) se acerca a la temperatura promedio del aire, con excepción de lugares en donde existen temperaturas bajo cero en periodos de invierno.

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.

El flujo de agua a lo largo de las celdas del humedal depende del gradiente hidráulico en la celda, así como la conductividad hidráulica, el tamaño y la porosidad del medio utilizado.

En la Tabla 4.7 se presentan características típicas del medio a ser potencialmente utilizados en humedales de flujo subsuperficial, 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.

Tipo de medio	Tamaño efectivo D10 (mm)*	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, ks (pie3/ pie2/ 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	16×10^4 a 82×10^4

Tabla 4.7. Características del medio en Humedales de Flujo Subsuperficial

Fuente: Reed et al., 1995

En teoría el desempeño de un sistema de humedales de flujo subsuperficial puede estar influenciado por factores hidrológicos. Tasas elevadas de evapotranspiración pueden aumentar las concentraciones del efluente pero también aumentar el tiempo hidráulico de retención del humedal. Tasas altas de precipitación pluvial pueden diluir la concentración de contaminantes pero también reducir el tiempo hidráulico de retención del humedal. En la mayoría de las zonas templadas en un clima moderado estos efectos no son críticos para el desempeño, estos aspectos hidráulicos solo deben ser considerados para valores extremos de evapotranspiración y precipitación.

Mecanismos de Remoción.

Se puede esperar que los humedales de *flujo subsuperficial* produzcan un efluente de alta calidad en términos de DBO, SST y organismos patógenos. Los principales mecanismos de remoción son la conversión biológica, filtración física, sedimentación, precipitación química y la adsorción. Se deben esperar remociones menores de nitrógeno, fósforo, metales y elementos orgánicos traza, no así para la DBO y los SST. La remoción depende del tiempo de retención, las características del medio, las tasas de la carga y las practicas de manejo.

Remoción de DBO: La remoción de DBO se logra de forma biológica y física, principalmente bajo condiciones anaerobias (no requiere presencia de oxígeno libre). Sin embargo, los microorganismos facultativos convierten una parte de la DBO. La tasa de remoción se relaciona con el tiempo de retención y la temperatura.

En la Tabla 4.8 se presentan los datos para el desempeño de la remoción de DBO. Esta parece ser rápida y confiable, en parte porque las plantas en descomposición no se encuentran en la columna de agua, y, por consiguiente, producen menos materia orgánica en el efluente final.

Concentración, mg/L					
Ubicación	**Tratamiento Preliminar**	**Afluente**	**Efluente**	**Remoción**	**Tiempo de retención,d**
Benton, Kentucky	Laguna de Oxidación	23	8	65	5
Mesquite, Nevada	Laguna de Oxidación	78	25	68	3,3
Santee, California	Primario	118	1,7	88	6
Sydney, Australia	Secundario	33	4,6	86	7

Tabla 4.8. Remoción de DBO para Humedales de Flujo Subsuperficial

Fuente: Reed et al., 1995

Remoción de sólidos suspendidos totales (SST): La falta de una superficie de agua libre en los humedales subsuperficiales evita las corrientes de aire y que los sólidos vuelvan a suspenderse, lo cual produce concentración potencial menor de

SST en el efluente. La mayoría de los sólidos se depositan o son atrapados en el 10 al 20% del tramo inicial del flujo en el lecho. Observaciones en varios sistemas de flujo subsuperficial en funcionamiento indican la obstrucción en la zona de la entrada, lo cual genera flujo subsuperficial en una porción del trayecto. Al parecer, la obstrucción es el resultado de cargas altas de sustancias orgánicas y sólidos en la zona de entrada del lecho. La obstrucción más severa ha ocurrido con lechos estrechos que reciben un efluente cargado de algas proveniente de lagunas facultativas. Las algas son atrapadas en el medio cerca de la entrada y las algas descompuestas añaden carga orgánica. Los humedales de flujo subsuperficial son eficientes en la remoción de sólidos suspendidos, con niveles usuales de SST en el efluente que se encuentra por debajo de 10 mg/l.

Remoción de Nitrógeno: La remoción de nitrógeno se realiza por nitrificación/denitrificación. Aunque los humedales de flujo subsuperficial tienen la capacidad de denitrificar el nitrógeno presente en forma de nitrato, lo que limita la remoción de nitrógeno es la etapa de nitrificación. El régimen de flujo subsuperficial es casi anaerobio, excepto a pocas pulgadas de la superficie y de los lugares aerobios cercano a las raíces de las plantas.

La nitrificación requiere un suministro de oxígeno, bien sea de las raíces de las plantas, por reaireación superficial, por recirculación del efluente, o por la carga intermitente que induce el flujo de oxígeno en el medio entre las aplicaciones. Para la aireación complementaria se utilizan tubos ubicados justo debajo de la superficie que proveen oxígeno en cierto punto del flujo donde la DBO se ha reducido por debajo de 30 mg/l, de manera que las bacterias nitrificantes puedan utilizar dicho oxígeno. Los promedios de remoción de nitrógeno varían de entre el 20 al 70%. Cuando los tiempos de retención superan de 6 a 7 días, se puede esperar una concentración de nitrógeno total en el efluente cerca de 10 mg/l, suponiendo que la concentración de nitrógeno en el efluente es de 20 a 25mg/l. Si el agua residual aplicada se nitrificó (usando aireación extendida, riego superficial y recirculación en filtros de arena). La remoción de los nitratos por medio de la denitrificación se puede lograr con tiempos de retención de 2 a 4 días.

Remoción de Fósforo: Se requieren medios especiales para realizar una remoción efectiva del fósforo por adsorción. El fósforo puede liberarse durante ciertas épocas del año, en general en respuesta a los cambios de las condiciones ambientales dentro del sistema. Sin embargo, la remoción de fósforo en este tipo de sistemas es poco efectiva debido al contacto limitado entre los lugares de absorción y el agua residual que se aplica. Dependiendo de la tasa de carga, del tiempo de retención y de las características del medio, las remociones pueden variar entre el 10 al 40% para concentraciones de fósforo a la entrada entre 7 a 10 mg/l. La asimilación por parte de las plantas es en general de menos de 10% (aprox. 0.5 kg/ha-día).

Remoción de metales: Los mecanismos para la remoción de metales incluyen adsorción, sedimentación, precipitación química y su asimilación por parte de las plantas. Los metales pueden liberarse durante ciertas épocas del año, generalmente en repuesta a cambios en los potenciales de oxido-reducción dentro del sistema. Los datos sobre la remoción de metales de las aguas residuales municipales en humedales de flujo subsuperficial son limitados. En los sistemas de drenaje de minas ácidas es significativa la remoción de hierro y manganeso. Datos experimentales demuestran que en un sistema de flujo subsuperficial en California, US la remoción de cobre, zinc y cadmio fue de 98% en promedio.

Remoción de compuestos orgánicos traza: La disponibilidad de datos es limitada, las remociones pueden varia de 88 a 99% (Reed et. Al, 1995). Los mecanismos de remoción incluyen la adsorción y biodegradación.

Remoción de organismos patógenos: La remoción de las bacterias y los virus se lleva a cabo por adsorción, filtración, sedimentación y predación. En Santee, California, se encontró una remoción de 99% de coliformes totales cuando se aplicó un efluente primario a 2 pulg/día (tiempo de retención de 6 días).

Ventajas.-A continuación se citarán las ventajas que se tendrían al diseñar y construir un sistema de humedal artificial con flujo subsuperficial:

- Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.

- Pueden ser menos costoso para construir, así como su operación y mantenimiento puede ser menos costosa 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 lugares donde hay fríos extremos.
- La operación a nivel de tratamiento terciario es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos. La configuración de los humedales proporciona una buena protección térmica.
- Este tipo de sistemas no produce biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.
- Son muy efectivos en la remoción de DBO, DQO, SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es posible pero se requiere un mayor tiempo de retención.
- Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con este tipo de humedales mientras se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial del flujo se

mantenga. También se elimina el riesgo de que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.

Desventajas.-A continuación se citarán las desventajas que se tendrían al diseñar y construir un sistema de humedal artificial con flujo subsuperficial:

- Este sistema requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno 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 de flujo subsuperficial es anóxica, limitando el potencial de nitrificación

del amoníaco del agua residual. El aumento de 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 de este tipo han sido utilizados con éxito. Los humedales de flujo subsuperficial 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 de flujo subsuperficial 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, por ejemplo por medio de la luz ultravioleta.
- A pesar de requerir un área no muy extensa para la remoción de contaminantes, el precio de la grava puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor a 227,000 lt/día.

Los mecanismos básicos de tratamiento son los mencionados anteriormente, e incluyen sedimentación, adsorsión, precipitación química e interación biológica con la DBO y el nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. Si no se practica la poda se encuentra una fracción de vegetación que se descompone y que permanece como materia orgánica refractaria, que termina formando turba en el humedal. Los nutrientes y otras sustancias asociadas a esta fracción rafractaria se considera que son eliminados permanentemente en el sistema. En la fgura 4.9. se observan los principales procesos que se llevan a cabo en los humedales y que permiten la depuración del agua residual.

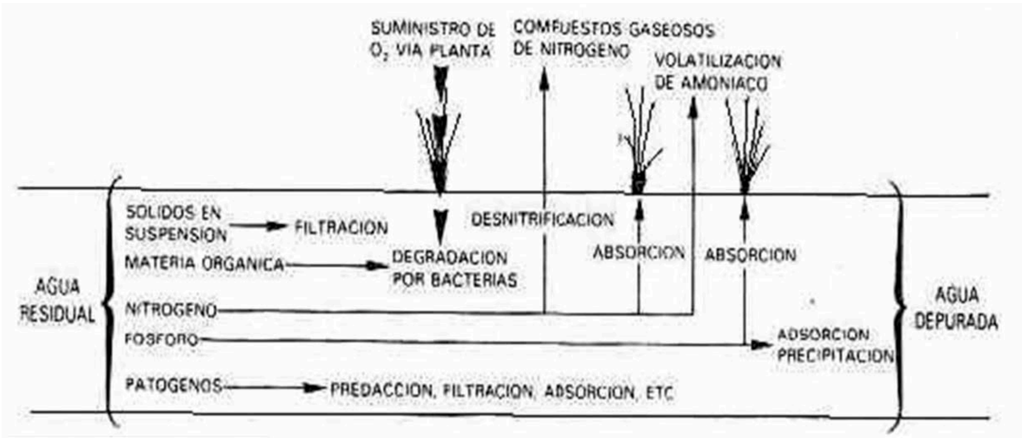

Figura. 4.9. Esquema típico de un Humedal Artificial de FlujoSubsuperficial