

Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM

A design of an artificial marsh for treating waste water in the UNMSM

Wilmer Alberto Llagas Chafloque¹, Enrique Guadalupe Gómez²

RESUMEN

En este trabajo se presenta una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en la Ciudad Universitaria de la UNMSM con el uso de humedales artificiales.

Muchos «sistemas naturales» están siendo considerados con el propósito del tratamiento del agua residual y control de la contaminación del agua. El interés en los sistemas naturales está basado en la conservación de los recursos asociados con estos sistemas como opuesto al proceso de tratamiento convencional de aguas residuales que es intensivo respecto al uso de energía y químicos. Los wetlands son uno de los muchos tipos de sistemas naturales que pueden usarse para el tratamiento y control de la contaminación. Según U.S. EPA (1983), «Un wetland se construye específicamente con el propósito de controlar la contaminación y manejar los residuos, en un lugar donde existe un wetland natural.

La forma en que estos humedales trabajan tiene similitud con los procesos biológicos que se dan en la naturaleza y en los filtros por goteo utilizados en las plantas de tratamiento convencionales (Wolverton, 1988).

Los objetivos de este trabajo son: Diseñar un sistema de humedales artificiales tipo sistema de agua superficial libre (SASL) para el tratamiento de aguas residuales en la Ciudad Universitaria de la UNMSM y describir la formulación matemática de los procesos biológicos en el humedal artificial. Los humedales estarían recibiendo las aguas residuales provenientes de la red de alcantarillado de la Ciudad Universitaria.

Palabras clave: Diseño de humedades, Tratamiento de aguas residuales, Matemática de procesos biológicos.

ABSTRACT

In this work an alternative is presented for the wastewater treatment in the University City of the UNMSM with the use of wetlands.

Many «natural systems» they are being considered with the purpose of the wastewater treatment and control of the contamination of the water. The interest in the natural systems this based on the conservation of the resources associated with these systems like opposed to the process of conventional for wastewater treatment that is intensive regarding the energy use and chemical. The wetlands are one of the many types of natural systems that can be used for the treatment and control of the contamination. According to U.S. EPA (1983). «A wetland is built specifically with the purpose of to control the contamination and to manage the waste, in a place where a natural wetland exists.

The form in that these wetlands works has similarity with the biological processes that are given in the nature and in the filters for leak used in the conventional treatment plants (Wolverton, 1988).

The objectives of this work are: to design a system of wetlands type system of free superficial water (SFSW) for the wastewater treatment in the University City of the UNMSM and to describe the mathematical formulation of the biological processes in the wetlands. The wetlands would be receiving the residual waters coming from the net of sewer system of the University City.

Keywords: Marsh design, Waste Water Treating, Biological Processes' Mathematics.

¹ Egresado de la Diplomatura en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible. UPG - FIGMMG, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

² Docente de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

INTRODUCCIÓN

La importancia de los humedales ha variado con el tiempo. En el período carbonífero, es decir, hace 350 millones de años, cuando predominaban los ambientes pantanosos, los humedales produjeron y conservaron muchos combustibles fósiles (carbón y petróleo) de los que hoy dependemos.

El progreso del conocimiento científico de los humedales ha puesto en evidencia unos bienes y servicios más sutiles y han sido descritos a la vez como los riñones del medio natural, a causa de las funciones que pueden desempeñar en los ciclos hidrológicos y químicos, y como supermercados biológicos, en razón de las extensas redes alimentarias y la rica diversidad biológica.

Los humedales son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y acuático y sirven como enlace dinámico entre los dos. El agua que se mueve arriba y abajo del gradiente de humedad, asimila una variedad de constituyentes químicos y físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos, estos a su vez se transforman y transportan a los alrededores del paisaje. Dos procesos críticos dominan el rendimiento en el tratamiento de los humedales: la dinámica microbial y la hidrodinámica. Los procesos microbiales son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la renovación de las aguas residuales en los humedales.

Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales artificiales para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales. Los wetlands logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial. Además, interactúan con la atmósfera.

Los wetlands operan casi a velocidades de flujo y caudal constante y están sujetos a drásticos cambios en la remoción de DBO, debido a los cambios en la temperatura del agua, por esta razón en zonas templadas estos sistemas de tratamiento tienden a variar su eficiencia durante el año. En zonas cálidas y tropicales, los parámetros climatológicos: temperatura, radiación solar y evapotranspiración varían en un rango menor que en zonas templadas. Los efectos de la evapotranspiración no son notorios sobre una base diaria, pero pueden medirse en reducciones en el flujo de salida y un incremento en la concentración de DBO en el curso de una estación. Pero estos impactos hidrológicos parecen menores en comparación con los efectos de temperaturas estacionales sobre la concentración de DBO a la salida.

ANTECEDENTES

Algunos wetlands construidos al inicio por investigadores, probablemente, comenzaron sus esfuerzos basados en las observaciones de la capacidad de tratamiento evidente de humedales naturales.

Existen descargas documentadas que se remontan a 1912. Estudios sobre wetlands construidos para tratamiento de aguas residuales se iniciaron en la década del cincuenta en el Instituto Max Planck en Alemania-USA, fueron desarrollados en los años setenta y ochenta. En los años noventa se vio un mayor incremento en el número de esos sistemas, como la aplicación se expandía no solo para tratamiento de agua residual municipal, sino también para agua de tormenta, industrial y residuos agrícolas.

Autores como Kadlec Robert H. y Knight R. L. (1993) dan cuenta de una buena historia del empleo de humedales naturales y construidos para el tratamiento de aguas residuales y disposición.

Los wetlands habían sido usados a finales de los años noventa para disposición de aguas residuales, muchas descargas fueron a los wetlands naturales.

Otros vieron las aguas residuales como una fuente de agua y sustancias nutritivas para restauración o creación de wetlands. Benefield, L.D. and C.W. Randall (1980): diseño de procesos biológicos para tratamiento de aguas residuales.

MARCO TEÓRICO

Humedales naturales

Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial autodepurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie.

los humedales ocupan el espacio que hay entre los medios húmedos y los medios, generalmente, secos y de que poseen características de ambos, por lo que no pueden ser clasificados categóricamente como acuáticos ni terrestres (Hammer y Bastian, 1989). Lo característico de un humedal es la presencia de agua durante períodos lo bastante prolongados como para alterar los suelos, sus microorganismos y las comunidades de flora y fauna hasta el punto de que el suelo no actúa como en los hábitat acuáticos o terrestres. Las profundidades típicas de estas extensiones de tierras son menores a 0,60 m donde crecen plantas emergentes como juncos, *typha* «totora»,

duck weed «lenteja de agua» (ver Fig. 1) que contribuye a la reducción de contaminantes a través de procesos aerobios de degradación.

Funciones de los humedales artificiales

Las actividades humanas han dado y siguen dando origen a varios tipos de humedales de interés para algunas especies vegetales y animales. Las graveras y otro tipo de excavaciones abandonadas, restauradas o poco alteradas, albergan distintos tipos de hábitats (Hammer, D.A.&R.K. Bastian, 1989; Russell, R.C., 1999).

- **Proceso de remoción físico**

Los wetlands son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociado con material particulado. El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los wetlands, debido al flujo laminar característico y la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes. La sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo y por el hecho de que el flujo es con frecuencia laminar en los wetlands. Las esteras de plantas en los wetlands pueden servir como trampas de sedimentos, pero su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material particulado.

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad de particulado fijo y la longitud del wetland. Para propósitos prácticos, la sedimentación es usualmente considerada como un proceso irreversible, resultando en acumulación de sólidos y contaminantes asociados sobre la superficie del suelo del wetland. Sin embargo, la resuspensión de sedimento puede resultar en la exportación de sólidos suspendidos y reducir algo más bajo la eficiencia de remoción. Algo de resuspensión podría ocurrir durante periodos de velocidad de flujo alta en el wetland. Mas comúnmente la resuspensión es el resultado de la turbulencia de la dirección del viento, bioturbación (perturbación por animales y humanos) y desprendimiento de gas. El desprendimiento de gas resulta a partir de gases como el oxígeno, a partir de la fotosíntesis del agua, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica (Benfield, L.D. and C.W. Randall, 1980).

- **Proceso de remoción biológico**

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los wetlands. Extensamente reconocido para la remoción de contaminantes en los wetlands es

la captación de la planta. Los contaminantes que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, tales como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del wetland. Sin embargo, muchas especies de plantas del wetland son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo. La velocidad de remoción de contaminante por las plantas varía extensamente, dependiendo de la velocidad de crecimiento de la planta y de la concentración del contaminante en tejido de planta. Las plantas leñosas, es decir, árboles y arbustos, proporcionan un almacenamiento a largo plazo de contaminantes, comparado con las plantas herbáceas. Sin embargo, la velocidad de captación de la contaminante unidad de área de tierra es, a menudo, mucho más alta para las plantas herbáceas, o los macrophytes, tales como cattail. Las algas pueden también proporcionar una cantidad significativa de nutrientes captados, pero son más susceptibles a los efectos tóxicos de metales pesados. El almacenaje de alimentos en algas es relativamente a corto plazo, debido al rápido ciclo de rotación (corto ciclo de vida) de algas. Las bacterias y otros microorganismos en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo, y algunos otros contaminantes.

En los wetlands, el material de la planta muerta, conocido como detritus o basura, se acumula en la superficie del suelo. Algunos de los nutrientes, metales u otros elementos eliminados previamente del agua por captación de la planta son pérdidas del detritus de la planta por la lixiviación y descomposición, y reciclados nuevamente dentro del agua y del suelo. La lixiviación de contaminantes solubles en agua puede ocurrir rápidamente en la muerte de la planta o del tejido de planta, mientras que una pérdida más gradual de contaminantes ocurre durante la descomposición del detritus por las bacterias y otros organismos.

En la mayoría de los wetlands, hay una acumulación significativa del detritus de la planta, porque la velocidad de descomposición disminuye substancialmente bajo condiciones anaerobias que prevalecen, generalmente, en suelo del wetland. Si, sobre un período extenso de tiempo, la velocidad de descomposición de la materia orgánica es más baja que la velocidad de deposición de la materia orgánica en el suelo, la formación de turba ocurre en el wetland. De esta manera, algunos de los contaminantes captados originalmente por las plantas se pueden atrapar y almacenar como turba. La turba se puede acumular a grandes profundidades en los wetlands, y puede proporcionar el almacenamiento de larga duración para los

contaminantes. Sin embargo, la turba es también susceptible a la descomposición si el wetland se drena. Cuando sucede eso, los contaminantes incorporados en la turba se pueden liberar y/o reciclar o limpiar con un chorro de agua del wetland. Aunque los microorganismos pueden proporcionar una cantidad medible de contaminante captado y almacenado en sus procesos metabólicos, que desempeñan el papel más significativo en la remoción de compuestos orgánicos. Los descompuestos microbianos, sobre todo bacterias del suelo, utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de bióxido de carbono (CO_2) o metano (CH_4).

Esto proporciona un mecanismo biológico importante para la remoción de una amplia variedad de compuestos orgánicos, incluyendo éstos encontrados en aguas residuales municipales, aguas residuales de procesamiento de alimentos, plaguicidas y productos de petróleo. La eficiencia y la velocidad de degradación orgánica de C por los microorganismos es altamente variable para los diversos tipos de compuestos orgánicos. El metabolismo microbiano también produce la remoción de nitrógeno inorgánico, es decir, nitrato y amonio, en los wetlands. Bacterias especializadas (*pseudomonas* sp.) transforman metabólicamente el nitrato en gas nitrógeno (N_2), un proceso conocido como desnitrificación. El N_2 se pierde posteriormente a la atmósfera (Benefield, L.D. and C.W. Randall, 1980).

- **Proceso de remoción químico**

El proceso químico más importante de la remoción de suelos del wetland es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes. La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la solución (agua) a la fase sólida (suelo). La absorción describe realmente un grupo de procesos, que incluye reacciones de adsorción y de precipitación. La adsorción se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico o absorción química. El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de la arcilla y de

la materia orgánica en el suelo. Esto es una unión mucho más débil que la unión química, por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo. Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes, incluyendo el amonio (NH_4^+) y la mayoría de trazas de metales, tales como cobre (Cu^{+2}). La capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico (CEC), aumenta generalmente con el aumento de contenido de la arcilla y de la materia orgánica. La absorción química representa una forma más fuerte y más permanente de vinculación que el intercambio catiónico. Un número de metales y de compuestos orgánicos se puede inmovilizar en el suelo vía la absorción química de las arcillas, y los óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al), y materia orgánica. El fosfato también puede unirse con la arcilla y los óxidos de Fe y Al a través de la absorción química. El fosfato puede también precipitarse con los óxidos de hierro y aluminio para formar un nuevo mineral compuesto (fosfatos de Fe y Al), que son potencialmente muy estables en el suelo, produciendo el almacenamiento de fósforo a largo plazo. Otra reacción importante de precipitación que ocurre en los suelos del wetland es la formación de sulfuros de metales. Tales compuestos son altamente insolubles y representan los medios eficaces para inmovilizar muchos metales tóxicos en wetlands. La volatilización, que implica la difusión de un compuesto disuelto desde el agua en la atmósfera, es otro mecanismo potencial de la remoción del contaminante en los wetlands. La volatilización del amoníaco (NH_3) puede dar lugar a la remoción significativa de nitrógeno, si el pH del agua es alto (mayor que 8,5). Sin embargo, a pH más bajo cerca de 8,5, el nitrógeno del amoníaco existe casi exclusivamente en forma ionizada (amonio, NH_4^+), que no es volátil. Muchos tipos de compuestos orgánicos son volátiles, y se pierden fácilmente a la atmósfera desde los wetlands y de otras aguas superficiales. Aunque la volatilización puede remover con eficacia ciertos contaminantes del agua, puede demostrar ser indeseable en algunos casos, debido al potencial para contaminar el aire con los mismos contaminantes. (Benefield, L.D. & C.W. Randall, 1980).

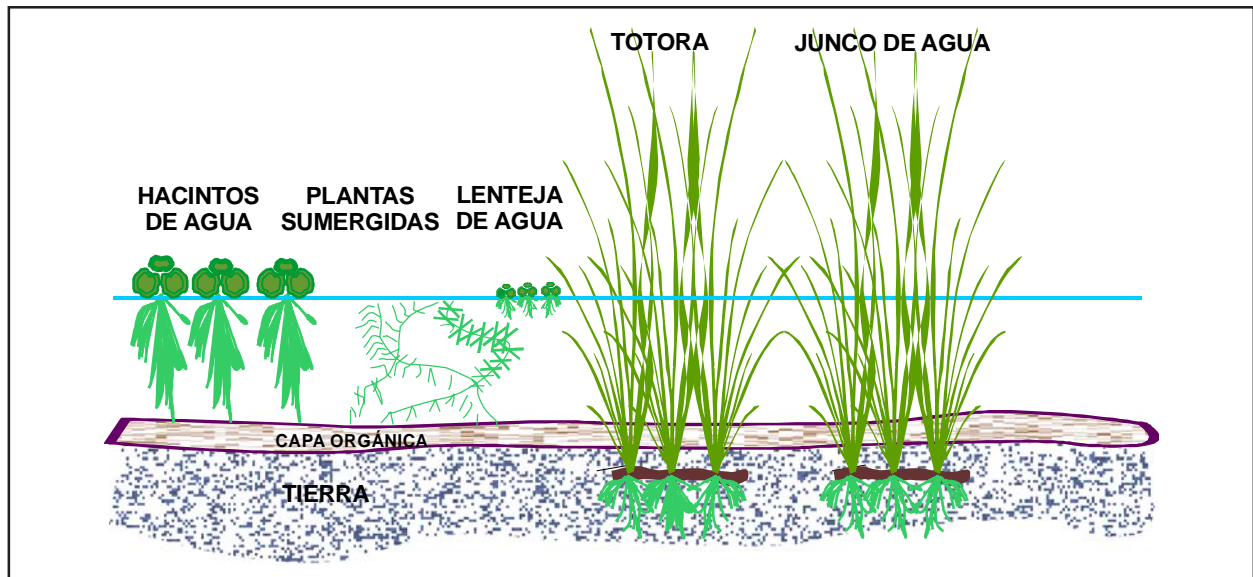


Figura 1. Plantas acuáticas (adaptado de Tchobanoglous, G. *Aquatic plant systems for wastewater treatment*).

Humedales artificiales

Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas, y contando con los procesos naturales para tratar el agua residual. Los wetlands construidos tienen ventajas respecto de los sistemas de tratamiento alternativos, debido a que requieren poca o ninguna energía para operar. Si hay suficiente tierra barata disponible cerca de la instalación de los wetlands de cultivo acuático, puede ser una alternativa de costo efectivo. Los wetlands proporcionan el hábitat para la vida silvestre, y son, estéticamente, agradables a la vista.

Tipos de humedales artificiales

- **Sistema de agua superficial libre (SASL)**

Estos sistemas consisten típicamente de estanques o canales, con alguna clase de barrera subterránea para prevenir la filtración, suelo u otro medio conveniente a fin de soportar la vegetación emergente, y agua en una profundidad relativamente baja (0,1 a 0,6 m) que atraviesa la unidad. La profundidad baja del agua, la velocidad baja del flujo, y la presencia de tallos de planta y basura regulan el flujo del agua. Se aplica agua residual pretratada a estos sistemas, y el tratamiento ocurre cuando el flujo de agua atraviesa lentamente el tallo y la raíz de la vegetación emergente (ver figura 2).

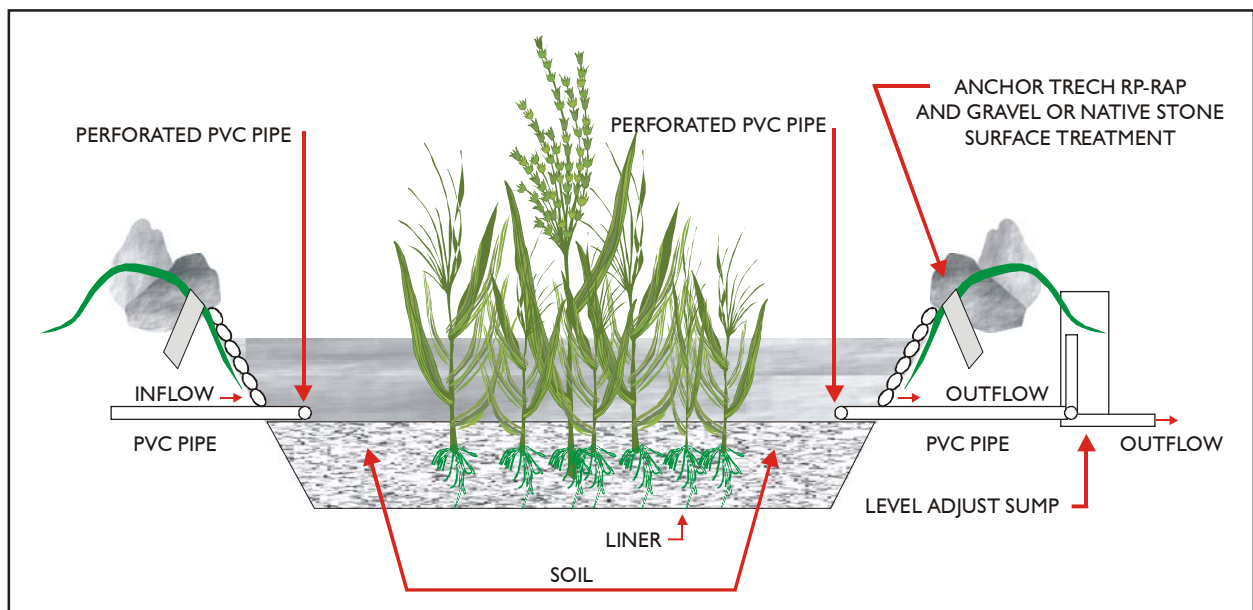


Figura 2. Sistema de Agua Superficial libre (SASL).

● **Sistemas de flujo bajo la superficie (SFBS)**

Estos sistemas son similares a los filtros horizontales por goteo en las plantas de tratamiento convencionales. Se caracterizan por el crecimiento de plantas emergentes usando el suelo, grava o piedras como sustrato de crecimiento en el lecho del canal. Dentro del lecho los microbios facultativos atacan al medio y las raíces de las plantas, contactando de este modo el agua residual que

fluye horizontalmente a través del lecho; mientras que el sobrante baja a la superficie del medio (Kadlec *et al.*, 1993). Estos sistemas de flujo bajo superficie son diseñados con el propósito de obtener niveles de tratamiento secundarios, son llamados «la zona de raíces» o «filtros de piedras de junco y caña» desarrollado en Alemania Oriental (ver Fig. 3).

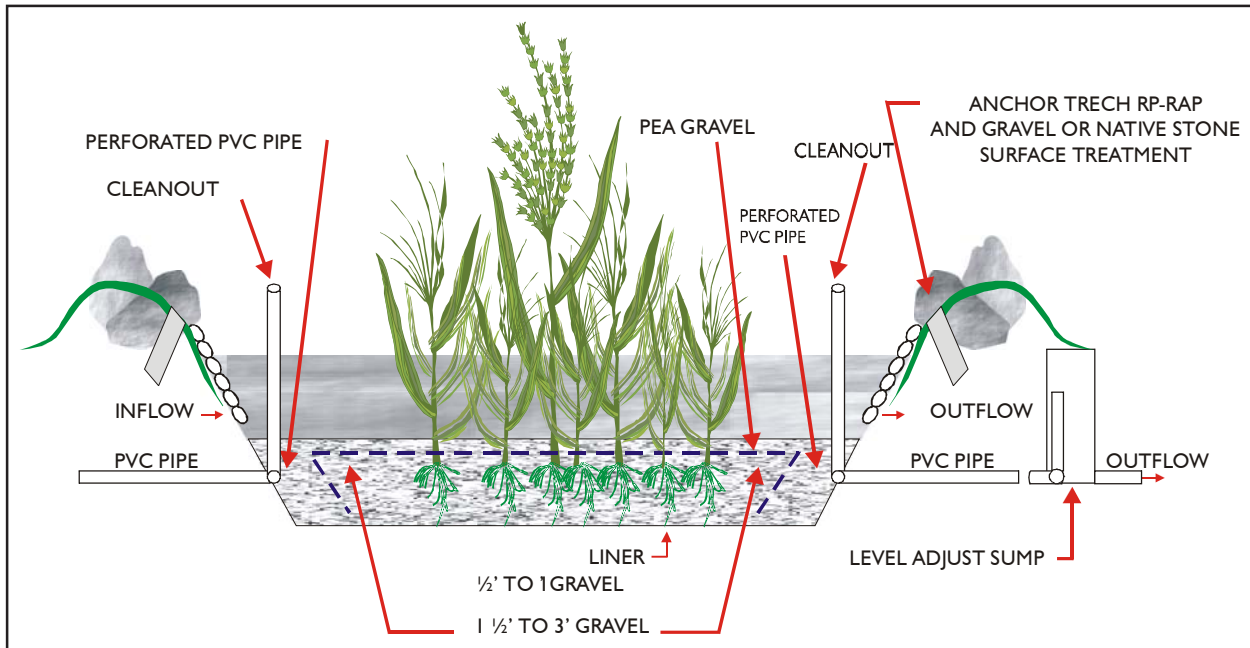


Figura 3. Sistemas de flujo bajo la superficie (SFBS).

● **Plantas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales**

Los sistemas de plantas acuáticas están en los estanques poco profundos como plantas acuáticas flotantes o sumergidas. Los sistemas más completamente estudiados son aquellos que usan el hacinto de agua o lenteja de agua. Estos sistemas incluyen dos tipos basados en tipos de plantas dominantes. El primer tipo usa plantas flotantes y se distingue por la habilidad de estas plantas para derivar el dióxido de carbono y las necesidades de oxígeno de la atmósfera directamente. Las plantas reciben sus nutrientes minerales desde el agua. El segundo tipo de sistema consiste en plantas sumergidas, se distingue por la habilidad de estas plantas para absorber oxígeno, dióxido de carbono, y minerales de la columna de agua. Las plantas sumergidas se inhiben fácilmente por la turbiedad alta en el agua porque sus partes fotosintéticas están debajo del agua.

Tabla 1. Funciones de las plantas en sistemas de tratamiento acuático.

Raíces y/o tallos en la columna de agua.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Superficies sobre la cual la bacteria crece. 2. Medio de filtración y adsorción de sólidos.
Tallos y/o hojas sobre la superficie del agua.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Atenúan la luz del sol y así previenen el crecimiento de algas. 2. Reducen los efectos del viento en el agua. Es decir, transferencia de gases entre la atmósfera y el agua. 3. Importante en la transferencia de gases para y desde las partes sumergidas de la planta.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar un Humedal artificial tipo Sistema de Agua Superficial Libre (SASL).
- Describir la formulación matemática de los procesos biológicos en el Humedal artificial.

Objetivo específico

- Proponer el uso del agua proveniente del humedal para el riego de áreas verdes y áreas destinadas al servicio de limpieza en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

PROPUESTA DE DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL TIPO SISTEMA DE AGUA SUPERFICIAL LIBRE (SASL) EN LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE LA UNMSM

Aguas residuales

Las aguas residuales para este estudio estarían siendo producidas en la Ciudad Universitaria de la UNMSM, la temperatura promedio es de 21°C en la mayoría del año. El agua utilizada en la Ciudad Universitaria es de 15 m³ por día.

Estas aguas residuales serán recolectadas en una laguna de almacenamiento a través de una tubería de PVC de 12 pulgadas (Fig. 4). El volumen de esta laguna será de 566,7396 m³ (20000 pies³), y sirve como un recipiente de sedimentación primaria. El efluente de esta laguna será bombeado o, si está a desnivel, se llevará a través de un caudal a las celdas experimentales, a través de tuberías de PVC de 3 pulgadas que alimentan a dos (2) celdas, seguidas por otras dos (2) celdas finales (Fig. 4).

Los efluentes de las celdas finales serán conectados a una tubería de 4 pulgadas de PVC y bombeados o, si está a desnivel, se llevará a través de un caudal a una segunda laguna de almacenamiento (Fig. 4).

Plantas acuáticas

Las plantas acuáticas pueden ser seleccionadas de pantanos locales y transplantadas dentro de las cuatro celdas disponibles en el sistema de experimentación, una (1) celda estará sin vegetación y servirá como blanco para efectos comparativos de los tratamientos, las plantas a ser usadas en esta investigación se presentan en la Tabla 2.

Estas plantas han sido usadas por otros autores para el tratamiento de aguas residuales de uso municipal o doméstico. Las plantas serán seleccionadas de humedales naturales del lugar, tales como los humedales de San Juan de Miraflores, de Villa en Chorrillos, y de Ventanilla.

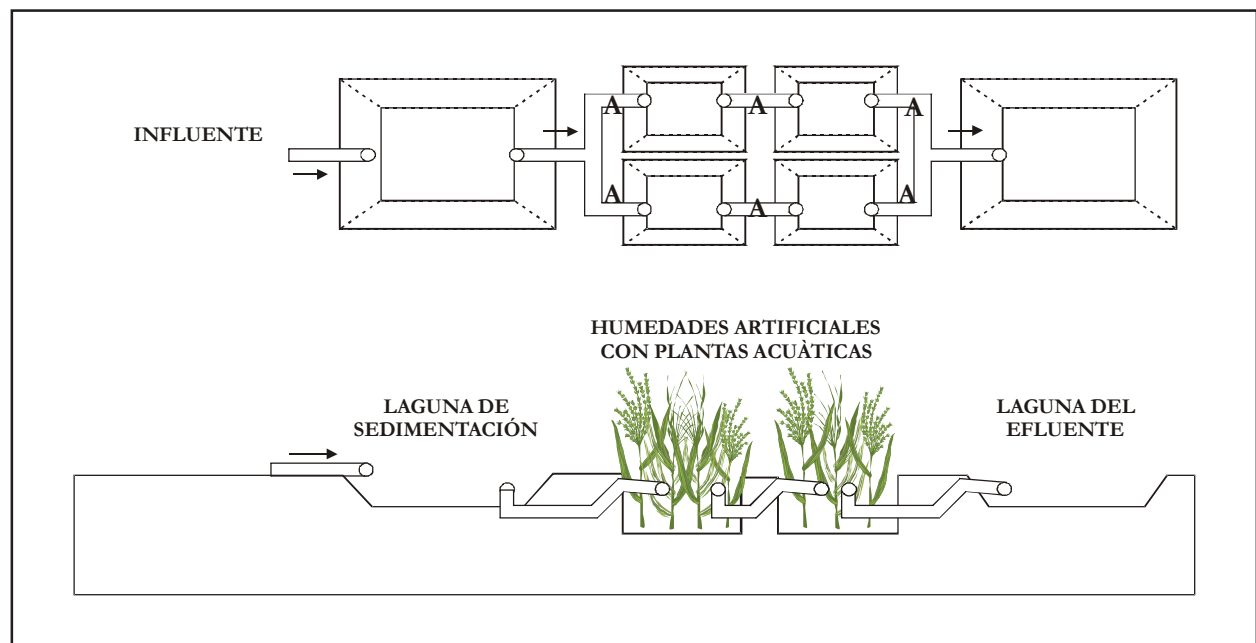


Figura 4. Diagrama de flujo de la posición relativa de la laguna de sedimentación del agua de entrada (influyente), celda de humedales artificiales y laguna del efluente (Palomino, 1996).

Condiciones hidráulicas

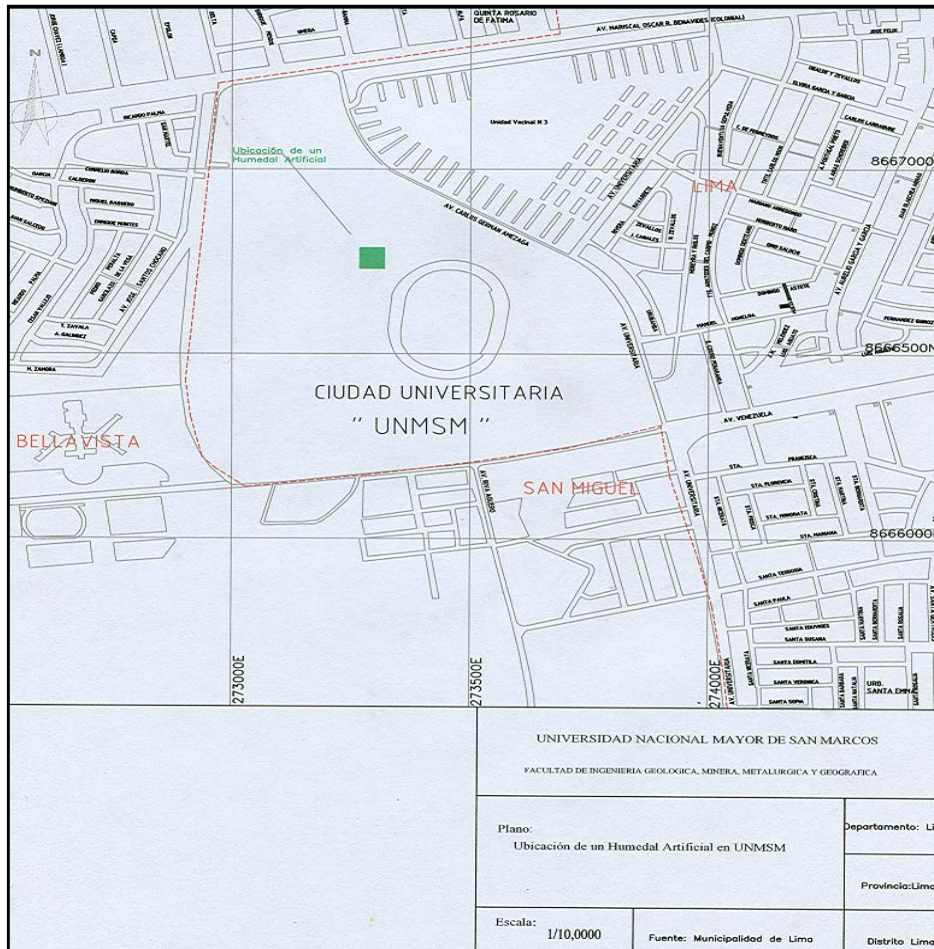
Las aguas residuales serán transportadas a una laguna de almacenamiento a través de una tubería de 12 pulgadas de PVC. Luego serán bombeadas a las dos

(2) celdas experimentales, cubierta con la vegetación, el efluente de estas dos charcas pasará como efluente a las dos (2) charcas finales. (Palomino, 1995).

Tabla 2. Plantas acuáticas emergentes utilizadas en tratamiento de aguas residuales Reed, S.C., J Miledlebrooks and R.W., Crites (1995).

Nombre común	Nombre científico	Distribución	Temperatura en °C		Máxima salinidad	Rango de pH efectivo
			Deseable	Germinación de la semilla	Tolerancia ppmil	
Totora	Typha spp.	En todo el mundo.	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10
Caña común	Phragmites communis		12 - 23	10 - 30	45	2 - 8
Junco	Juncus spp		16 - 26		20	5 - 7.5
Junco	Scirpus		18 - 27		20	4 - 9
Carrizo	Carex spp		14 - 32			5 - 7.5

* Partes por mil.



Ubicación del humedal artificial en la ciudad universitaria UNMSM.

EXPERIENCIA FORÁNEA SOBRE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Dimensiones de un humedal artificial basado en la carga orgánica (DBO₅) por el área (método analítico de Reed y otros 1995)

A. Requerimientos de entrada

Q = 15 m³/día (529,34358 pies³/día)

DBO = 20 Lb/día

T = 21°C

Condiciones de salida DBO₅ < 30 mg/L

Características de lagunas anaerobias usadas como unidad de pretratamiento:

Tabla 4. Reducción del DBO₅ en función del tiempo de retención y temperaturas mayores de 20°C.

Tiempo de retención (d)	Reducción de DBO ₅ (%)
1	50
2,5	60
5	70

Fuente: Wastewater Stabilization Ponds, *Principles of Planning & Practice*, WAO, 1987

Tabla 5. Reducción de DBO₅ como función del tiempo de retención y temperatura.

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (d)	Reducción de DBO (%)
10	5	0 - 10
10 - 15	4 - 5	30 - 40
15 - 20	2 - 3	40 - 50
20 - 5	1 - 2	40 - 60
25 - 30	1 - 2	60 - 80

Fuente: Wastewater Stabilization Ponds, *Principles of Planning & Practice*, WAO, 1987

Determinación de la concentración de entrada al humedal mg/L

Carga orgánica DBO = Q x C_e

20 Lb/día = 529,34358 pies³/día

C_e = 0,03778 lb/pies³

C_e = 0,03778 lb/ pies³ x (16016,6 mg/L x lb/pies³)

C_e = 605,1495 mg/L

Tiempo de retención

Despejando la ecuación (11)

$$\frac{C_s}{C_e} = A \exp \left[\frac{-0,7K_T (A_v)^{1,75} L_{wyn}}{Q} \right]$$

$$\frac{C_s}{C_e} = A \exp \left[\frac{-0,7K_T (A_v)^{1,75} t}{Q} \right]$$

$$t = \frac{\ln C_e + \ln C_s + \ln A}{0,7 K_T (A_v)^{1,75}}$$

Siendo A_v = 15,7 m²/m³

A = 0,7 - 0,85 (efluente secundario)

De la ecuación (16)

$$K_T = 0,0057(1,06)^{(T - 20)}$$

$$K_T = 0,0057(1,06)^{(21 - 20)}$$

$$K_T = 0,006042$$

Reemplazando en la ecuación del tiempo se tiene:

$$t = \frac{\ln(605,1495) + \ln(30) + \ln(0,85)}{0,7 (0,006042) (15,7)^{1,75}}$$

$$t = 5,43 \text{ días}$$

de acuerdo a la ecuación (10) el tiempo de retención hidráulico es:

$$t = \frac{L W y n}{Q}, \text{ siendo } A_s = L.W$$

$$t = \frac{A_s y n}{Q}$$

$$A_s = \frac{Q t}{y n}$$

$$A_s = \frac{15 \times 5,43}{0,1778 \times 0,95} = 482,21 \text{ m}^2$$

También se puede obtener el área resolviendo la ecuación (16)

$$A_s = \frac{15(\ln(605,1495) - \ln(30) + \ln(0,85))}{0,7(0,006042) (15,7)^{1,75} (0,1778) (0,95)}$$

$$A_s = 481,8591 \text{ m}^2$$

Para determinar las dimensiones del humedal basados en la relación L: W = 4:1

W = ancho del humedal

L = longitud del humedal = 4 W

$$A_s = 4 w w = 481,8591 \text{ m}^2$$

$$W = 10,98 \text{ m}$$

$$L = 4 W = 43,92 \text{ m}$$

$$\frac{L}{W} = \frac{43,92}{10,98} = 4$$

$$W = 10,98$$

Para efectos de cálculo el área de $482,21 \text{ m}^2 \sim 483 \text{ m}^2$ se desea establecer 4 celdas

$$483/4 = 120,75 \text{ m}^2$$

$$L W = 4 W W = 120,75 \text{ m}^2$$

$$4 W^2 = 120,75 \text{ m}^2$$

$$W^2 = 120,75/4$$

$$W = 5,4943 \text{ m}$$

$$W = 5,4943 \text{ m} \sim 5,49 \text{ m}$$

$$L = 4 W = 21,9772 \text{ m} \sim 21,97 \text{ m}$$

B. Para la laguna de tratamiento primario (anaeróbica)

$$V = 20000 \text{ pies}^3 = 566,7396 \text{ m}^3$$

Asumiendo que $L = 4 W$

Y con la ecuación (7.1) (Reed e at al. 1995)¹⁸

$$V = [LW + (L-2sd)(w-2sd) + 4(L-sd)(w-sd)] d/6$$

Considerando una altura de 3 metros

$$V (6/d) = [4W W + (4W-2.3.3)(w-2.3.3) + 4(4W-2.3)(w-2.3)]$$

$2V = 24 W^2 - 210 W + 468$, dividiendo entre 24 se tiene, $0,0833 V = W^2 - 8,75 W + 19,5$

$$W^2 - 8,75 W = 0,0833 (566,7396) - 19,5$$

$$W^2 - 8,75 W = 27,7094$$

Completando cuadrados para el desarrollo de la ecuación se tiene:

$$W^2 - 8,75 W + 19,1406 = 27,7094 + 19,1406$$

$$(W - 4,375)^2 = 46,85$$

$$W - 4,375 = 6,8447$$

$$W = 11,2197 \approx 11,22 \text{ m}$$

$$L = 4W = 44,8788 \approx 44,88 \text{ m}$$

El área total de las lagunas de tratamiento primario y de almacenamiento son:

$$\text{Área Total} = [2 (11,22 \times 4,88)] = 1007,1072 \text{ m}^2$$

Área total utilizada para los estanques y las lagunas será:

$$\text{Área Total} = [1007,1072 + 483,00] = 1490,1072 \text{ m}^2$$

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Muestra N° 1

- Inicio de la experiencia primera semana de julio.
- Agua residual cargada de masa orgánica, olor desagradable, putrefacto.
- Tiempo de almacenamiento 10 días, con un volumen de 20 litros.
- Agua marrón con presencia de microorganismos, después de 12 horas de reposo.

- Agua con desperdicios de vísceras, sangre, excremento, plumas, etc.



Muestra N° 2

- Agua residual proveniente de la muestra N° 1 después de 10 días de reposo con algunas plantas de totora y junco, se aprecia un tono claro del agua
- Los microorganismos disminuyen.
- Las plantas de junco (seco), salicornea, totora seca y una planta de totora con un pequeño brote.
- La masa orgánica empieza a disminuir, se nota turbidez y sedimento.



Muestra N° 3

- Agua residual proveniente de la muestra N° 2 después de 5 días de almacenamiento.
- Las plantas en su mayor parte son totora, la eiyndra y junco están como prueba en esta parte. En las anteriores muestras estas plantas no resistieron la demasiada carga orgánica.
- El agua se observa un poco más clara que la muestra anterior, se pueden visualizar sus raíces.
- El olor ha disminuido hasta ese punto.
- El color es ligeramente marrón y se aprecia unos brotes en algunas plantas.



Algunas consideraciones en la realización de la experiencia:

1. La temperatura ambiental fue de aproximadamente 15°C - 16°C.
2. Las plantas utilizadas en la experiencia son: Totorá, hydrocotilo, einydra, salicornia y junco.
3. Antes de iniciar la experiencia se usó agua residual municipal, las plantas no se aclimataron y se murieron.
4. Las condiciones que favorecen esta experiencia son: La aireación, la temperatura y las plantas para el tipo de agua residual
5. No se realizó ningún análisis del efluente final.



Plantas usadas en la experiencia.



CONCLUSIONES

- La dimensión de las celdas para el diseño del humedal en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos está en la relación largo: ancho (4:1); relación influenciada fuertemente por el régimen hidráulico y la resistencia al flujo dentro del sistema. El flujo a través del humedal tiene que vencer la resistencia a la fricción impuesta por la vegetación y la capa de residuos, la energía para superar esta resistencia es suministrada por el caudal calculado entre la entrada y la salida del humedal. Relaciones desde 1:1 hasta 3:1 son también aceptables.
- Los modelos matemáticos analizados para los sistemas de agua superficial libre (SASL) requieren ser comprobados con datos de campo ya que son sensibles a los cambios de temperatura en los lugares donde se van a llevar a cabo.
- El agua proveniente de este humedal será usada en los servicios de riego de las áreas verdes como: jardines, Estadio Universitario, áreas externas y áreas destinadas al servicio de limpieza de la Ciudad Universitaria, como uno de los objetivos de este proyecto.

RECOMENDACIONES

- La aplicación de este modelo de humedal en otras zonas del país va a depender de la geografía del terreno, el cual dictará la forma general y configuración del humedal; la temperatura del lugar va de acuerdo con la estación, así en invierno la altura de los humedales generalmente tiene que ser incrementada para almacenar más calor en la columna de agua; la disponibilidad de las plantas para evitar la necesidad de aclimatación.
- Se debe usar material impermeabilizante en la construcción de los humedales debido al tipo de

suelo de la Ciudad Universitaria y la potencial pérdida de agua por infiltración y la contaminación del agua subterránea debajo del humedal, mientras hay algunos wetlands donde la infiltración es deseable, la mayoría de las aplicaciones requiere algún tipo de barrera para prevenir la contaminación del agua subterránea. Bajo condiciones ideales, los lugares de los wetlands consistirían de suelos naturales con baja permeabilidad que restringen la infiltración.

- Los datos de campo provenientes de los modelos matemáticos analizados para los sistemas de agua superficial libre (SASL) servirán para comprobar el modelo propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Benefield, L.D. & C.W. Randall (1980). *Biological process design for wastewater treatment*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.
2. EPA (1983). *Environmental protection agency wetlands and aquatic plants systems for municipal wastewater treatment*. 625/1-88/022. US EPA.
3. Hammer, D.A. & R. K. Bastian (1989). «Wetlands ecosystems: natural water purifiers», Chapter 2 in *Constructed wetland for wastewater treatment*, ed by D.A. Hammer, Lewis Publishers, Chelsea, MI.
4. Kadlec, R. H. W. Bastian, & D. T. Urban (1993). «Hydrological design of free water surface treatment wetlands». In G. Moshiri (ed). *Constructed wetlands for water quality improvement*; Lewis Publishers, Chelsea, MI, pp. 77-86.
5. Knight, Robert L. (1994). *Treatment wetlands data base now available*. *Water environment & technology*. Vol. 6, 2: 31-33 for water quality treatment, U.S. Environmental protection agency, risk reduction environmental laboratory; Cincinnati, OH.
6. Palomino Zevallos Johnny (1996). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química.
7. Reed, S. C., J. Miledlebrooks & R. W., Crites (1995). *Natural systems for waste management & treatment*. First edition. Mc Graw Hill, New York.
8. Reed, S. C., J. Miledlebrooks & R. W., Crites (1988). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, First edition. Mc Graw Hill, New York.
9. Russell, R.C. (1999). *Natural systems for waste management and treatment wetlands*. McGraw Hill, New York. Constructed wetlands and mosquitoes health hazards.
10. Tchobanoglous, G. and E. D., Schorodoeder (1985) *Water quality: Characteristics, modeling, modification*. Addison-Wesley, Reading, MA.