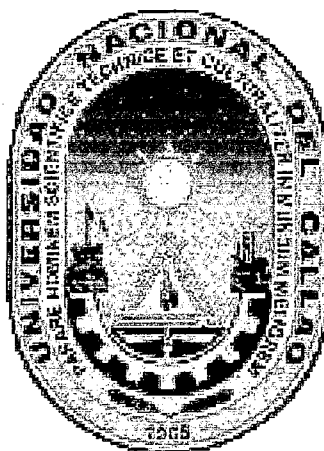


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES**



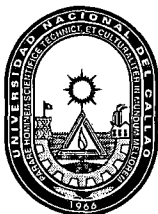
DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS EN LAGUNAS ARTIFICIALES DEL PARQUE DE LA EXPOSICIÓN

BACH. ALEJANDRO CARDENAS SOTO

para optar el Título Profesional de

INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

**CALLAO – PERU
2004**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL

En la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional del Callao sito en Av. Juan Pablo II s/n Bellavista - Callao, en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, a los 27 días del mes de Diciembre del año 2004, siendo las 14:00 horas se reunió el Jurado Evaluador designado con Resolución N° 089-2004-CF-FIARN de fecha 05 de Julio del 2004 integrado por los siguientes docentes:

MsC. Blga. María Teresa Valderrama Rojas	Presidenta
Dr. Rolando Reátegui Lozano	Secretario
Mg. María Antonieta Gutiérrez Díaz	Vocal
Mg. Miguel Antonio Ventura Napa	Asesor

Con el fin de dar inicio a la Sustentación de Tesis del señor Bachiller ALEJANDRO CARDENAS SOTO quién habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustenta la Tesis titulada "DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS EN LAS LAGUNAS ARTIFICIALES DEL PARQUE DE LA EXPOSICIÓN"; luego de la sustentación correspondiente se procedió a un ciclo de preguntas a cargo del Jurado, y luego de las deliberaciones del caso acordaron Aprobar por Unanimidad la Tesis con el calificativo de Muy Bueno.

Siendo las 15:20 horas del día 27 de Diciembre del 2004 se dio por finalizada la Sustentación.

MsC. Blga. Teresa Valderrama Rojas
Presidenta

Dr. Rolando Reátegui Lozano
Secretario

Ing. María Antonieta Gutiérrez Díaz
Vocal

Ing. Miguel Antonio Ventura Napa
Asesor

RECONOCIMIENTO

En primer término quiero agradecer a todos mis profesores quienes forjaron mi formación académica en cada una de las materias de la currícula.

Al Jurado Revisor de esta tesis **Blgo. Ms. C. Maria Teresa VALDERRAMA ROJAS, Dr. Rolando REATIGUI LOZANO, Ing. Maria Antonieta GUTIERREZ DÍAZ.**

Al **Ing. Miguel VENTURA NAPA**, Director de la Tesis.

A la Comisión de Grados y Títulos, al Profesor **Sergio LEIVA** y la Profesora **Elva TORRES T.**

Al **Dr. Rubén RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ**, mi profesor al cual tengo mi más sincero respeto y mejor consideración por su calidad profesional

A mis padres por su apoyo siempre y sus cariños, que sin su participación esta Tesis se hubiera retrasado.

A mis hermanos **César, Angélica, Mariela**, por su apoyo moral y económico en circunstancias tan difíciles por las que atraviesa el país.

A mis amigos y camaradas de largas jornadas, quienes siempre me han apoyado y confiado en mí.

DEDICATORIA

A mis amigos César MANCO POMACAJA y Alex QUISPE VALENCIA, por su apoyo incondicional en cada instante que fuere necesario de quienes tengo gratos recuerdos y el eterno agradecimiento.

DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LAS LAGUNAS ARTIFICIALES DEL PARQUE DE LA EXPOSICION

Reconocimiento	i
Dedicatoria.....	ii
Índice.....	iii
Resumen.....	vii
Abstrac.....	viii
Introducción.....	ix

Capítulo I : EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento de la Investigación	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Importancia de la Investigación	3
1.5 Hipótesis	3
1.6 Variables e Indicadores de la Investigación.....	4

Capítulo II : MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes	5
2.2 Base Teórica.....	7
2.2.1 Sistema de Tratamiento Natural	7
2.2.2 Humedales Naturales	7
2.2.3 Función de los Humedales	8
2.2.4 Humedales Artificiales	9
2.2.5 Tipos de humedales artificiales.....	10
2.2.5.1 Sistema a Flujo Libre (FWS)	10
2.2.5.2 Sistemas de Flujo Subsuperficial (S.F.S).....	10
2.2.5.3 Importancia de los humedales artificiales.....	11
2.2.6 Marco Legal	14

Capítulo III : MARCO METODOLOGICO

3.1 Metodología de la Investigación	17
3.1.1 Tipo de Investigación	17

3.2	Área de Estudio	17
3.2.1	Universo	17
3.3	Materiales y Métodos.....	17
3.3.1	Materiales	17
3.3.1.1	Material Temático	12
3.3.1.2	Materiales de Trabajo	12
3.3.2	Métodos para diseño de humedales artificiales.....	18
3.3.2.1	Evaluación e Identificación de la Infraestructura de Lagunas Artificiales	18
3.3.2.2	Metodología para el tratamiento de aguas en las Lagunas artificial-Parque de la Exposición.....	23

Capítulo IV : DESCRIPCION GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

4.1	Ubicación Geográfica.....	27
4.2	Ambiente Físico	28
4.3	Situación Actual	28
4.3.1	Parque de la Exposición	28
4.4	Ambiente Cultural	28
4.4.1	Síntesis Histórica del Parque de la Exposición	28

Capítulo V : BASES CIENTÍFICAS PARA EL DISEÑO Y USO DE PLANTAS ACUÁTICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

5.1	Fundamento	31
5.2	Efectividad del Sistema Artificial.....	35
5.2.1	Remoción de DBO	37
5.2.2	Remoción de Sólidos Suspendidos	38
5.2.3	Remoción de Nitrógeno	39
5.2.4	Remoción de Fósforo	44
5.2.5	Remoción de Metales	45
5.2.6	Remoción de Coliformes Fecales	45
5.3	Componentes para el diseño de Humedales Artificiales	46
5.3.1	El agua	46
5.3.2	Sustratos, Sedimentos, y Restos de Vegetación	46
5.3.3	Vegetación	47
5.3.4	Microorganismos	48
5.4	Condiciones para la construcción del humedal	49
5.4.1	Impermeabilización	50
5.4.2	Densidad de la Vegetación	50
5.4.3	Estructura de salida y entrada	51

Capítulo VI : ANALISIS MATEMÁTICO

6.1 Ecuaciones que gobiernan el diseño y funcionamiento de Humedales Artificiales en Sistema Flujo Subsuperficial	54
6.2 Forma de Diseño	54
6.2.1 Humedad Artificial Tipo Sistema Subsuperficial.....	54
6.2.2 Diseño Hidráulico	57
6.2.2.1 Resistencia de Flujo	58
6.2.2.2 Procedimiento de diseño hidráulico para Sistema de Flujo Subsuperficial	59
6.3 Aspectos Térmicos	64
6.3.1 Humedales de Flujo Subsuperficial	65
6.4 Modelo de Diseño para la Remoción de DBO ₅	68
6.5 Modelo de Diseño para la Remoción de Sólidos Suspendidos	70
6.6 Modelo de Diseño para Remoción de Nitrógeno	72
6.7 Humedales de flujo subsuperficial	72
6.7.1 Nitrificación	73
6.7.2 Desnitrificación	76
6.7.3 Nitrógeno Total	78
6.8 Modelo de Diseño para Remoción de Fósforo	79
6.9 Dimensionamiento del Humedal Artificial tipo sistema Subsuperficial (S.F.S.)	81
6.9.1 Descripción del Sistema	81
6.9.2 Datos Técnicos del Sistema	82
6.9.3 Lista de Materiales	82
6.9.4 Diseño de Humedal Artificial Sistema bajo de Superficie (S.F.S.)	83
6.9.5 Costos de Instalación y Operación.....	87
6.9.5.1 Costo de Instalación	89
6.9.5.2 Costo de Operación	89

Capítulo VII : RESULTADOS

7.1 Infraestructura de las Lagunas Artificiales	91
7.1.1 Interpretación de Resultados	94
7.1.2 Calificación de Agua en Lagunas Artificiales	94
7.2 Recurso Hídrico y Mantenimiento	94
7.3 Deterioro de la Infraestructura Perimétrica	94
7.4 Alternativas de solución	94
7.4.1 Diseño de un área húmeda Artificial	94
7.5 Viabilidad del Sistema Artificial	95
7.6 Beneficios Ambientales	95

Capítulo VIII : DISCUSIÓN

Discusión 96

Capítulo IX : CONCLUSIONES

9.1 Ventajas y Desventajas 98

9.2 Conclusiones Finales 99

Capítulo X : RECOMENDACIONES

Recomendaciones..... 100

Capítulo XI : REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Referencias Bibliografias..... 101

Anexos :Ejemplo de Calculo de Diseño de un Humedal Artificial de Flujo
Sub Superficial. 105

Apéndice 110

RESUMEN

“El Diseño de Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas en las Lagunas Artificiales del Parque de la Exposición” es la aplicación metodológica de la información reciente y disponible de la literatura en particular para el sistema de tratamiento natural en Humedales Artificiales que utiliza plantas, suelos y sus microorganismos asociados para la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos del agua residual .

El principio metodológico proporciona una superficie horizontal del flujo y camino hidráulico a través de la zona de raíces y rizosfera a lo largo de las cuales puede fluir el agua residual. Los Humedales Artificiales pueden tratar con efectividad altos niveles de DBO₅, SST, N, también niveles significativos de metales , trazas orgánicas y patógenos, sin embargo la remoción de fósforo es mínima .

En cuanto al diseño no existe un consenso único entre las diferentes investigaciones realizadas en Norteamérica y los países europeos , por lo cual es necesario realizar trabajos de investigación tendientes a adecuar los modelos de diseño a las condiciones locales.

ABSTRAC

“Humedales Artificiales's Diseño in order to the waters treatment in the Lagoons Artificiales of the Exposition's Parque ” application is metodológica of the literature's recent and available information in particular in order to the natural-treatment system in Humedales Artificiales that utilizes plants, grounds and his associated microorganisms in order to the organic- and- inorganic- compounds degradation of the residual water.

The beginning metodológico provides the flow's horizontal surface and hydraulic road through the zone of roots and rizosfera along which can flow the residual water. Them Humedales Artificiales they can have to do with with effectiveness high levels DBO5, SST, N, also significant metals levels, you draw organic and pathogenic, however the match removal is minimal.

An only consent among the different investigations accomplished in Norteamérica and the European countries, whereby it is necessary to accomplish works fact-finding does not exist As to the design tending to make suitable models to the local conditions designing.

INTRODUCCION

El Diseño y aplicación de Humedales Artificiales es una tecnología viable para la depuración de aguas residuales, especialmente si son de origen doméstico y pueden llegar a tener gran futuro en países en vías de desarrollo con características de climas tropicales o subtropicales.

Los humedales artificiales procura idéntica capacidad de tratamiento, de aguas residuales, utilizados en las plantas de tratamiento convencional. Existen dos tipos de sistemas artificiales desarrollados para el tratamiento de aguas residuales: (1) Sistemas de flujo libre (F.W.S), y (2) Sistema de flujo subsuperficial (S.F.S) en la cual el tratamiento se produce durante la circulación de aguas a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente.

En el presente trabajo se investigó el uso de Humedales Artificiales tipo sistema de flujo subsuperficial (S.F.S) como una metodología para el tratamiento de aguas en las lagunas artificiales del Parque de la Exposición.

El Sistema Artificial se basa en la aplicación y análisis matemático de las ecuaciones que gobiernan el diseño y funcionamiento de humedales artificiales, las cuales presentan, los principales parámetros y modelos de calculo para el diseño y la eliminación de carga orgánica, inorgánica e involucra bases científicas para el uso de plantas acuáticas, como también el medio (materiales) para tratar aguas residuales.

Por lo mismo incluye diferentes estudios de investigación en Norteamérica y otros países de Europa, que confirman la efectividad en el rendimiento para la eliminación de carga orgánica. En consecuencia la propuesta metodológica presenta el diseño de un área húmeda artificial tipo sistema de flujo subsuperficial (S.F.S) para el tratamiento de aguas en lagunas artificiales del Parque de la Exposición. De la misma manera se proporciona una base técnica y científica para que los gobiernos locales y regionales puedan replicar esta metodología en otros ámbitos de nuestra región.

CAPITULO I

EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

La responsabilidad de controlar la contaminación urbana, dentro y alrededor de las ciudades incumbe a los gobiernos locales o municipales. De no existir una toma de conciencia de los gobiernos locales sobre su responsabilidad no será posible lograr soluciones y los efectos seguirán produciéndose con funestas consecuencias para la salud pública.

En este sentido con el ánimo de apostar al estudio de la problemática ambiental, la búsqueda de estrategias y alternativas se plantea la depuración de aguas en: (1) Humedales artificiales y plantas acuáticas, (2) recirculación del agua en las lagunas artificiales. La aplicación de esta técnica reducirá significativamente el consumo de agua potable y los gastos de mantenimiento por periodos de recambio.

El proyecto proporciona una base técnica para la sustitución de tecnologías costosas por medios naturales con la finalidad de alcanzar un mejor calidad ambiental, en este caso vinculado al recurso hídrico utilizado para fines recreativos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La tesis justifica su estudio, debido a que las lagunas artificiales del parque carecen de una infraestructura de circulación y reciclaje del agua. Donde los problemas más importantes que se observa en las unidades artificiales son: la contaminación hídrica destinadas para uso recreativo, gran demanda de agua potable por periodos de recambio y gastos operativos. Por lo tanto el proyecto propone mejorar la calidad de agua para uso recreativo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

- Mejorar la calidad del agua en las lagunas artificiales para uso recreativo y de preservación de la fauna acuática.

1.3.2 OBJETIVO ESPECIFICO

1. Diseñar un sistema de humedal artificial tipo sistema de flujo subsuperficial (S.F.S) para ser utilizado en tratamiento del agua en lagunas artificiales del Parque de Exposición.

1.4 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia implica la aplicación tecnológica de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales y mostrar los beneficios múltiples que ofrece los sistemas de tratamiento natural en la sustitución de tecnologías convencionales costosas.

Las áreas húmedas artificiales poseen un bajo costo y un aceptable método, económico para mejorar la calidad de agua, el principio técnico, se trata de un diseño especial que contempla plantas y suelos (medio) debidamente seleccionadas, tanto las características típicas y valores indicativos para el diseño de terrenos pantanosos artificiales.

Es de conocimiento general que el agua dulce esta distribuida de forma irregular en la superficie terrestre, los distintos pueblos y las diferentes civilizaciones han dedicado múltiples esfuerzos a proveerse de agua en cantidad y calidad para su vida cotidiana y para sus economías. En ocasiones le dedican un esfuerzo personal diario, como sucede en ciertas partes del país y Lima Metropolitana. Nuestros antepasados han construido emporios técnicos y mecánicos para recoger el recurso agua que siempre ha sido imprescindible.

1.5 HIPÓTESIS

H_N : De implementarse el diseño de Humedal para el tratamiento de aguas en las lagunas artificiales en el Parque de la Exposición es factible mejorar la calidad de agua para uso recreativo y preservación de fauna acuática.

H_a : De implementarse el diseño de Humedal para el tratamiento de aguas en las lagunas artificiales del Parque de la Exposición no es posible mejorar la calidad de agua para uso recreativo y preservación de fauna acuática.

1.6 VARIABLES E INDICADORES DE LA INVESTIGACIÓN

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLE INDEPENDIENTE	INDICADORES
<p>Y₁ : Mejorar la calidad de agua para uso recreativo y preservación de fauna acuática.</p>	<p>X₁ : Diseño de humedal de sección bajo la superficie (S.F.S.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad hidráulica del material filtro (grava). • Crecimiento y desarrollo de la planta acuática seleccionada. • Caudal hídrico de diseño. • Pendiente de diseño. • Actividad microbiana.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Las investigaciones para el diseño y tratamiento de aguas mediante humedales naturales y humedales construidos datan desde el inicio del siglo pasado esta iniciativa parte en los países de Europa y Norte América cuya tecnología es de mucha aceptación por sus beneficios múltiples y sus bajos costos de operación y fácil manejo.

Numerosos estudios confirman la posibilidad de usar los humedales artificiales en la depuración de aguas residuales urbanas, (Hill, 1979; Radoux y Kemp, 1982; Brix, 1987; Radoux y Kemp, 1988; Brix y Schierup, 1989; Martín y Fernández, 1992; Moore et al. 1994).

El inicio de esta tecnología hay que situarlo en las patentes del alemán K. Seidel del Max Planck Institute, con los sistemas conocidos como "*Reed Bed Treatment System*" (RBT) y "*Root Zone Method*" (RZM), posteriormente, en Francia, Reino Unido, y otros países de Europa se fueron instalando plantas de este tipo, hasta la creación en 1985 del Grupo Europeo de Sistemas de Tratamiento mediante Hidrófitas Emergentes (EHTS). Actualmente los humedales artificiales son utilizados como sistemas depuradores, en diversos países: Dinamarca, Alemania, Reino Unido, Francia, Austria, Suiza, Bélgica, Luxemburgo, Holanda y Suecia. En Estados Unidos se desarrollaron investigaciones sobre el uso de humedales, aplicando métodos ligeramente diferentes a los europeos, los "*Free Water System*" (FWS) y "*Subsurface Flow System*" (SFS).

Los estudios básicos sobre el potencial depurador de los humedales bajo diferentes condiciones de diseño se realizan en estaciones experimentales como las

situadas en Viville (Bélgica); Lallaing (Francia), Cambérene (Senegal), Arcata (California), Emmitsburg (Maryland) en EEUU y Mansilla en León (España); particularmente interesante resulta la experiencia de la empresa Severn Trent Limited en el Reino Unido, donde gestiona más de 1000 depuradoras de aguas residuales de pequeños núcleos de población (inferior a 2000 habitantes), sirviendo a 8.5 millones de consumidores, mediante Contactores Biológicos Rotativos y lechos de carrizo, con mínimo mantenimiento y 20 años de vida útil calculada (Findlay, 1997).

En España comienza a aplicarse esta tecnología, en algunas plantas de pequeño tamaño (García et al. 1997), y en dos EDAR con el sistema de humedales, que se construirán a cargo de la Diputación Provincial de León, como fruto de las experiencias de la Facultad de Biología de la Universidad de León (Ansola y de Luis, 1994, Ansola et al. 1995). Pero destaca el proyecto, actualmente en ejecución, de "Recuperación ambiental del tramo final del río Besos", para el que la Comisión de las Comunidades Europeas concedió una ayuda del Fondo de Cohesión por valor de 3.325 millones de pesetas. Este proyecto incluye la implantación en el margen del río de un tratamiento terciario mediante una zona húmeda artificial plantada con helófitos, para el efluente de la planta depuradora de Montcada y Reixac que trata una población equivalente de 360.000 habitantes (Alarcón et al., 1997).

En el Perú proyectos en pleno funcionamiento para el tratamiento de aguas en humedales artificiales son escasos sin embargo la Municipalidad Provincial del Callao viene ejecutando un proyecto a merced de un convenio de cooperación técnica internacional del tipo Public Pivate Partnership, la Agencia de Bioplanta GMBH y la ONG local Instituto Calidad de Vida INCAVI.

2.2 BASE TEÓRICA

2.2.1 SISTEMA DE TRATAMIENTO NATURAL

En el ambiente natural, ocurre la interacción entre el agua, el suelo, las plantas, microorganismos y la atmósfera, produciéndose procesos físicos, químicos y biológicos, estos procesos son utilizados con el objeto de proporcionar tratamiento al agua residual.

Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento convencional; sedimentación, filtración, transferencia de gases, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, oxidación, reducción química, conversión y descomposición biológicas; junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, la fotooxidación, y la asimilación por parte de las plantas.

A diferencia de los sistemas mecánicos, en los que los procesos se llevan a cabo, en forma secuencial, en diferentes tanques y reactores a velocidades aceleradas como consecuencia del aporte energético, en los sistemas naturales los procesos se producen a velocidades naturales y tienden a realizarse de forma simultánea en un reactor ecosistema.

2.2.2 HUMEDALES NATURALES

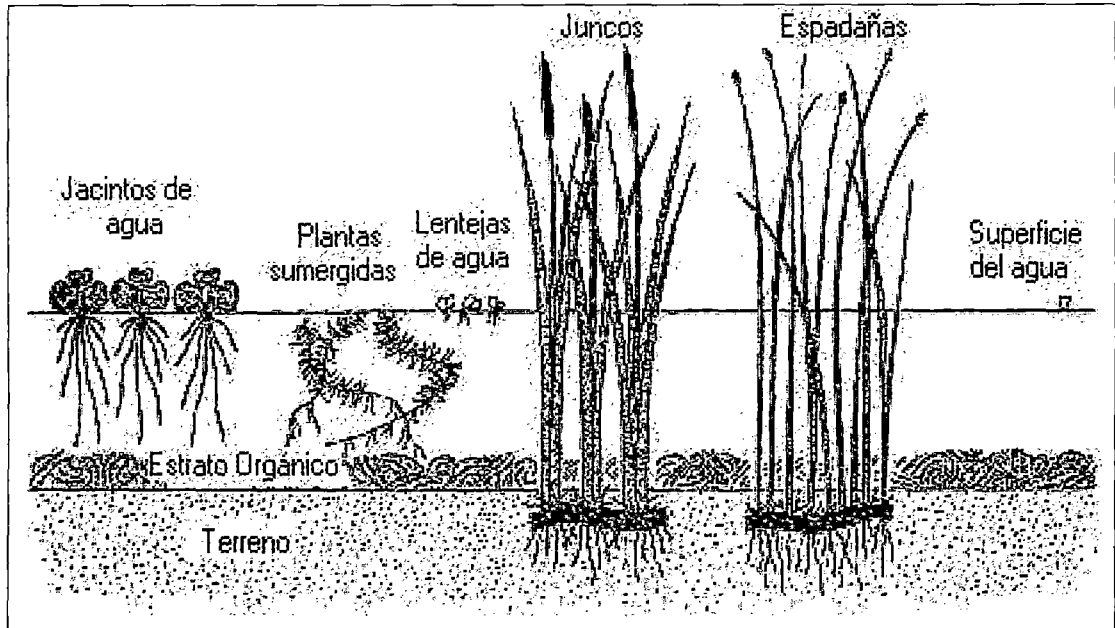
Son humedales las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros", con flora y fauna adaptadas a tales condiciones.



FIGURA 1. ÁREA PANTANOSA NATURAL

2.2.3 FUNCIÓN DE LOS HUMEDALES

Los humedales reciclan y reciben nutrientes provenientes de las tierras y las aguas. La población microbiana en los humedales es responsable de convertir estos nutrientes inorgánicos en gran cantidad de tejidos, fibra y materia orgánica que a su vez sirve de alimento para otros animales incluyendo al hombre. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60cm con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos (Véase **Figura 2**). La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.



**FIGURA 2. PLANTAS ACUÁTICAS COMUNES
(METCALF & EDDY, INC 1995)**

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales.

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar la carga orgánica e inorgánica por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

2.2.4 HUMEDALES ARTIFICIALES

Son sistemas artificiales construidos por el hombre semejante a una área pantanosa natural, diseñada, construida y operada para tratar aguas residuales utilizando los procesos físicos, químicos y biológicos de los sistemas naturales.

2.2.5 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

2.2.5.1 Sistemas a Flujo Libre (FWS)

Los sistemas FWS , suelen consistir en balsas o canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera subsuperficial, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos (0.1 a 0.6m).

2.2.5.2 Sistemas de Flujo Subsuperficial (S.F.S).

Son sistemas artificiales que consiste en canales o zanjas excavados y rellenos de material granular, generalmente grava en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de grava (Véase Figura 3). Las mismas especies vegetales se usan en los dos tipos de humedales artificiales.

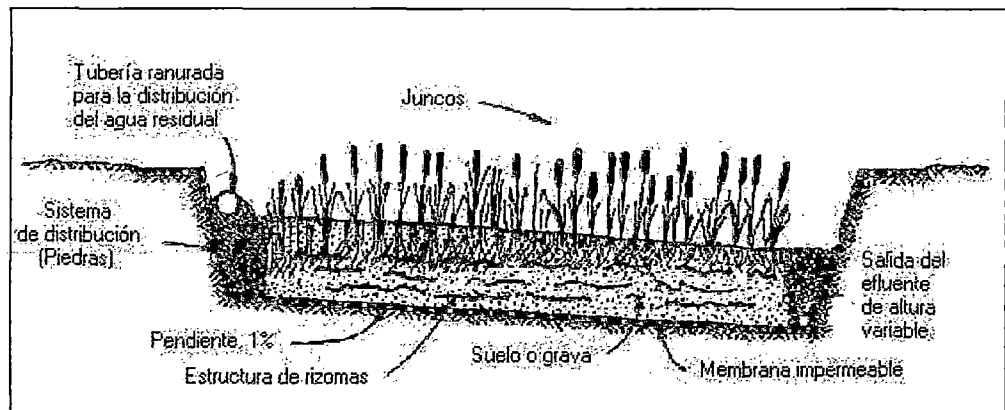


FIGURA 3. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN SISTEMA DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (METCALF & EDDY, INC 1995)

2.2.5.3 Importancia de los humedales artificiales

Los humedales artificiales proveen innumerables, bienes y servicios de importancia ambiental y valor económico, como se describe a continuación.

a) **Humedal construido**

Un "humedal construido" es una tecnología diseñada para imitar los procesos que ocurren en los humedales o ecosistemas húmedos naturales. Los "humedales construidos" utilizan plantas y suelos nativos de los humedales naturales y sus microorganismos asociados para mejorar la calidad del agua y proveer un mejoramiento ambiental. De esta manera los "humedales construidos" reciclan las aguas negras en forma natural a la vez que permiten el establecimiento de un hábitat húmedo de gran beneficio para la vida silvestre y que además ofrece múltiples oportunidades recreativas para las personas.

b) **Humedal diseñada para tratamiento de aguas y mejoramiento ambiental**

Un humedal para tratamiento de aguas es una tecnología natural y biológica, diseñada para tratar las aguas negras municipales e industriales y las aguas lluvias. Un humedal para mejoramiento ambiental se diseña para beneficiar a la comunidad en muchas otras maneras. Un humedal para mejoramiento ambiental puede proveer usos benéficos múltiples. Además del tratamiento y reciclaje del agua estos ecosistemas proveen hábitat para la vida silvestre, pueden dar abastecimiento de agua, pueden considerarse bancos para mitigaciones futuras, y permiten actividades de recreación pasiva en la forma de observación de aves, caminatas y otro tipo de esparcimiento asociado con el ambiente plácido y tranquilo del humedal así como la oportunidad de llevar a cabo educación ambiental. Las dos clases de sistemas de humedales se pueden diseñar en forma separada, o los atributos

importantes de cada clase se pueden integrar en un solo diseño que demuestre objetivos múltiples tanto para el tratamiento del agua como para el mejoramiento ambiental.

c) Proceso de tratamiento del agua en humedal construido

Los “humedales construidos” mejoran la calidad del agua por medio de una variedad de procesos naturales y biológicos que ocurren en los ambientes húmedos. En forma breve, podemos decir que los microorganismos que habitan en las plantas acuáticas y en los suelos del humedal transforman la materia orgánica y los nutrientes, presentes en las aguas negras, en otros tipos de nutrientes que pasan a formar parte de una comunidad diversa de plantas y vida acuática.

d) Rendimientos esperados

Correctamente diseñados y construidos, los humedales para el tratamiento pueden remover efectivamente la mayoría de los contaminantes asociados con las aguas negras municipales e industriales y las aguas de lluvia. Los humedales para tratamiento son especialmente eficaces en la eliminación de problemas y contaminantes tales como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos (S.S), nitrógenos (N), fósforo (P), hidrocarburos (H.C) y metales. Los “humedales construidos” son también una tecnología efectiva y segura para el tratamiento y recirculación de agua si se mantienen y operan correctamente.

e) Es apropiado el uso de los "humedales construidos" en cualquier lugar o clima

Se puede construir y operar un "humedal construido" en una gran variedad de áreas geográficas, incluyendo las regiones áridas, tropicales y montañosas. Incluso se puede tratar las aguas negras con altos niveles de nutrientes en , condiciones climáticas extremas donde ocurre congelamiento. Estos proyectos pueden variar mucho con respecto a tamaño, forma y ubicación, siendo el principal componente limitante el contar con suficiente terreno disponible.

f) Actualmente los humedales se utilizan en diferentes países

Hasta la fecha actual existen unos mil "humedales construidos" para el tratamiento de aguas negras municipales e industriales y aguas lluvias en los Estados Unidos. Esta tecnología es aceptada en muchas partes y su uso sigue aumentando. El tratamiento de las aguas negras por medio de humedales es más común en zonas costeras, pero su aplicación está presente tanto en pequeñas comunidades rurales y costeras como Mt. Angel en Oregón, hasta lugares turísticos montañosos y nevados como Incline Village en California y aún en grandes áreas urbanas y áridas, como Phoenix, Arizona.

g) Actividades de mantenimiento

El mantenimiento asociado con los humedales para tratamiento por lo general se limita al control de las plantas acuáticas invasoras y los vectores (por ejemplo los zancudos o mosquitos). Los vectores se controlan por medio de prácticas conocidas como el manejo integrado de plagas (MIP), por ejemplo introduciendo peces mosquitos o creando hábitat para golondrinas u

otras aves depredadoras de insectos. La acumulación de sedimento por lo general no se presenta como un problema en un “humedal construido” que ha sido bien diseñado y operado por lo que muy raramente o nunca se necesita dragar estos ecosistemas.

2.2.6 MARCO LEGAL

Existen abundantes normas legales en la Legislación Peruana relacionadas con el medio ambiente. Esto se concreta en la constitución política del país de 1993, donde se dedica dos títulos o temas como el Medio Ambiente. El Título I: ***“De la persona y la Sociedad”*** en su capítulo I ***“Derecho Fundamental de la Persona”***, en su capítulo II del ***“Medio Ambiente y los Recursos Naturales”***, y el título III ***“Del Régimen Económico”***

El Código Penal, Decreto Legislativo N° 635, lo estipula en el título XIII de los ***“Delitos contra los Recursos Naturales y el Medio Ambiente”*** en su Capítulo Único de los ***“Delitos contra los Recursos Naturales y el Medio Ambiente”***.

En el Perú, en los últimos años se ha tratado de poner en primer plano la Variable Ambiental. Esto a partir de la promulgación del Código del Medio Ambiente y de los recursos naturales, Decreto Legislativo N° 613, el cual define los lineamientos generales de la conservación de los recursos naturales y del medio ambiente, que coordine la ejecución de la política nacional del ambiente y garantice el cumplimiento de las funciones que la ley asigna a cada una de las dependencias de los gobiernos nacionales, regionales y locales.

Este Sistema Nacional del Ambiente, sería el equivalente a lo que es la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de Norteamérica, el cual establece regulaciones o estatutos estatales y federales.

Otro dispositivo legal promulgado es el Decreto Legislativo N° 757, Ley Marco para el crecimiento de la inversión privada que en su artículo 51° estipula que la autoridad sectorial competente determinará las actividades que por su riesgo ambiental pudieran exceder los niveles o estándares tolerables de contaminación o deterioro del medio ambiente.

En efecto se da un salto cualitativo en la materia ambiental al precisar las necesidades de efectuar la elaboración de estudios de impacto ambiental (EIA) previos al desarrollo de dichas actividades.

Precisa dicha norma legal que los (EIA) deberán ser formulados por empresas inscritas en el Registro de la actividad sectorial; la misma que establecerá los requisitos que deberán cumplirse para tal efecto.

Por otro lado, el Perú ha suscrito una serie de convenios internacionales encaminados, a proteger la biodiversidad y tomar medidas en salvaguardas de los problemas globales que enfrenta el planeta. Estos están referidos a: El Protocolo de Montreal, los acuerdos adoptados en Río de Janeiro, el Convenio de Brasilia sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, entre otros. Los principales tratados formados destacan el Antártico y el Amazónico (Anuarium 96, 1996). En el ámbito de la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías, el Código del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales en el Capítulo VI de la ciencia y tecnología en sus artículos 26°, 27°, 28° promueven y fomentan la investigación científica y tecnológica por parte del Estado; que permita cuantificar, prevenir, controlar y revertir el deterioro ambiental, adoptando alternativas de solución a los problemas vinculados a la protección del medio ambiente con tecnologías adecuadas. Igualmente promueve y fomenta la investigación científica y tecnológica que permita desarrollar nuevos sistemas, métodos, equipos y dispositivos a fin de proteger el ambiente y conservar los recursos naturales. A su vez los organismos competentes de ciencia y tecnológica están obligados a formar profesionales y técnicos para la realización de estudios científicos y tecnológicos en materia ambiental y el desarrollo de tecnologías

apropiadas que permitan un adecuado control y conservación medio ambiente. Como complemento a estas iniciativas las empresas públicas y privadas, en general, toda persona que por el desarrollo de sus actividades cause o pueda causar deterioro del medio ambiente, están obligadas a incorporar adelantos científicos y tecnológicos para reducir y eliminar el efecto contaminante.

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Las consideraciones tomadas en cuenta para realizar el presente estudio consiste en un método de “investigación aplicada”, principalmente en métodos utilizados en el campo de Ingeniería de aguas residuales con valores típicos para el diseño de humedales artificiales y emplazamiento del proyecto.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

3.2.1 UNIVERSO

Lagunas Artificiales del Parque de la Exposición

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 MATERIALES

3.3.1.1 MATERIAL TEMÁTICO

- a) Diseño de humedales construidos: recopilación de documentos nacionales y extranjeros sobre diseño y emplazamiento de áreas pantanosas artificiales como una metodología de tratamiento de aguas residuales y mejoramiento ambiental (Palomino 1995, Reed et al 1988, Mitsch y Gosselink, Hammer 1989, Metcal & Hedi 1995).
- b) Remodelación Parque de La Exposición se accedió a documentos de elaboración de proyectos y remodelación de Parques y Jardines como también del Parque de La Exposición (Memorias de Gestión Edil 1999-2000)

3.3.1.2 MATERIALES DE TRABAJO

- Computadora Pentium III – 233
- Scanner HP Sean Jet 3200C
- Libreta de Campo
- Software (autocad, Ms Word, excel)
- Material de escritorio (hojas, tinta, lapiceros, lápices, disquet, CD).
- Fotos panorámicas

3.3.2 MÉTODOS PARA EL DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Se hicieron las coordinaciones preliminares con los representantes de la Municipalidad Metropolitana de Lima y la empresa **INMOBILIARIA Municipal de Lima (EMILIMA)**, cuando se encontraba como Alcalde de la comuna el Dr. Alberto Andrade Carmona, a fin de efectivizar el estudio de la investigación referido al diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales provenientes de las lagunas artificiales del Parque de la Exposición bajo los siguientes criterios de:

- Evaluación Preliminar del diseño, redes de alimentación y desalojo de agua residual.
- Análisis microbiológico que amerite la calidad de agua para uso recreativo
- Diseño y dimensionamiento del sistema artificial.

3.3.2.1 EVALUACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DE LAGUNAS ARTIFICIALES

Se llevó a cabo la identificación de la infraestructura complementaria de las lagunas dentro y alrededor de ellas que a continuación se describen:

1. **Laguna Artificial del Parque Japones:** Consta de una estructura de material rústica cuya forma geométrica es de forma senozoidal, ocupa las $\frac{1}{4}$ partes del sector III abarca un área aproximada de $1380m^2$, con fondo

protegido de asfalto y canto rodado, cuenta de una red de recirculación impulsada de 2 bombas en paralelo con una capacidad de 1HP c/u, que permite formar una cascada artificial.

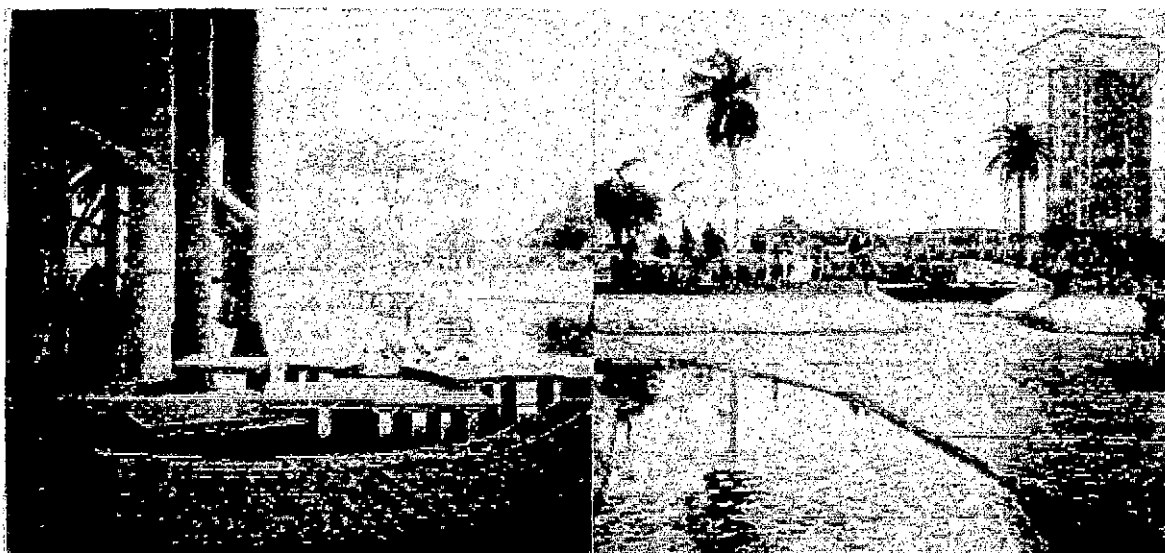


FIGURA 4. PARQUE DE LA EXPOSICIÓN (a) FIGURA 5. PARQUE DE LA EXPOSICIÓN (b)

2. **Laguna artificial:** Estructura de concreto armado de forma irregular que ha sido modificado tanto los niveles como su geometría, ocupa casi la totalidad del sector II, ubicado a espaldas (sur) del Teatro Abierto. Abarca un área aproximada de 4200 m² con fondo protegido por geomembrana HDPE de 1mm y protegido con geotextil, con acabado de canto rodado en el fondo y bordes de piedra granítica, es atravesada por un puente curvo de madera con rampas al ingreso y salida de adoquines de concreto de alta resistencia, está provista de iluminación con 2 reflectores subacuáticos en las gradas de la laguna colindante al Parque Botánico, 12 reflectores en los bordes de la laguna artificial con lámpara de 250 w de vapor de sodio y un tanque de compensación de 350 litros.

3. **Embarcadero:** Nueva construcción con columnas y viguetería de madera ubicada al oeste del sector II y de la Laguna Artificial, formando un área aproximada de 275 m² para recibir a las embarcaciones. Se dispone de un entablado de madera sobre columnas de concreto sumergidas. Está cubierta en su totalidad por una pérgola de vigas de madera, en cuya área hay 4 bancas de madera de 2.80 m. de largo.

4. **Isla de Títeres:** nueva construcción de madera y concreto de forma semielíptica ubicada en el centro del sector II, al sur de la Laguna artificial y del gran Teatro Abierto, conformado por un escenario, boletería y graderías de 7 niveles. Debajo de estas se encuentran dos SS.HH. tanto para niños como para niñas, dos, puentes de madera para ingresar a la Isla de títeres, asientos de madera barnizadas en todas las graderías, aleros de madera en forma triangular sobre las puertas de SS.HH., bancas de concreto y asiento de madera de 2.55 m de largo, baranda metálica con malla en todo el borde de las graderías de la Isla. Está provista de iluminación con braquetes tipo globo con lámpara de sodio de 70 W, 2 postes con luminaria sobre la tribuna con lámpara de halogenuro metálico de 150 w. Fachada exterior con pintura látex. Área total construida 110.91 m².

5. **Torreón de títeres:** Formada por una estructura de madera acabada en barniz que está provista de tomacorrientes dobles, interruptor simple, interruptor doble, cajas de pase, escalera fija de madera y artefacto tipo rejilla cuadrada con lámpara de 32 w.

6. **Servicios higiénicos para niñas:** Módulo de servicio publico debajo de las graderías de la isla de títeres, dispone de piso y zócalo de cerámica y pintura látex sobre los muros de concreto armado, ovalines con grifería temporizada, inodoros con fluxómetro, papeleras de losa, puertas metálicas para SS.HH. con cerrojo, puerta contraplacada con detalle de vidrio y cerradura tipo perilla, ventana triangular de vidrio con marco de madera, ventana triangular de vidrio triple con marco de madera sobre la puerta,

registro de 4", sumidero de 2" , artefactos con 2 lámparas de 36 W. interruptor simple y válvula de pase.

7. **Servicios higiénicos para niños:** Módulo de servicio publico debajo de las graderías de la isla de títeres, dispone de piso y zócalo de cerámico y pintura látex

sobre los muros de concreto armado, ovalines con gritería temporizada, inodoros con fluxómetro, papeleras de losa, puertas metálicas para a SS.HH. con cerrojo, puerta contraplacada con detalle de vidrio y cerradura tipo perilla, ventana triangular de vidrio con marco de madera, ventana triangular de vidrio con marco de madera sobre la puerta, registro de 4", sumidero de 2", artefactos con 2 lámparas de 36w, interruptor simple y válvula de pase.

8. **Abastecimiento de agua:** El abastecimiento de agua en las lagunas artificiales provienen de la red principal de SEDAPAL, para consumo humano (agua potable). En caso de escasez de agua potable, se cuenta con camiones cisternas para la compra de agua subterránea. Sin embargo como las lagunas carecen de una infraestructura adecuada para la recirculación y tratamiento del agua. Se produce la descomposición del agua en sus características físicas (color, olor, sabor), químicos (materia orgánica, inorgánica y gases) y biológica, haciendo inadecuadas para el uso al que está destinado. Las características del agua en las lagunas es muy diferente a la composición de las aguas residuales de origen urbano e industrial.

9. **Costo operación para mantenimiento de las lagunas artificiales y periodos de recambio al año**

- Costo de agua por periodo de recambio

$$[30.000 \text{ m}^3] \times \text{S/} 3.42 = \text{S/} 102,600 \cong \$ 29,739.13$$

- 5 peones de labores de mantenimiento y limpieza

$$5 [20.000 \text{ día hombre} \times 365 \text{ día/año}] = \text{S/} 36,500.00 \cong \$ 10,579.71$$

- Costo de operación de 2 bombas 1HP

$$C = 2 \left[\text{HP (us) - hr} \frac{0.7355 \text{ Kw - hr.}}{1 \text{HP (us) - hr}} \times 24 \frac{\text{Hr}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \times \text{S/}.0.386/\text{Kw - hr} \right]$$

$$C = \text{S/}. 4973.98 \cong \$1441.73$$

Pérdida del ingreso económico por la suspensión de actividades recreativas (alquiler de botes)

- Promedio calculado aprox. de 800 botes semanales, costo del alquiler S/5.00 Hora

$$\text{S/}.5.00 [800 \text{ botes}] = \text{S/}.4,000.00 \cong \$1159,42$$

- Un ingeniero para la supervisión del funcionamiento de la laguna artificial
\$1,200.00 mensual = \$ 14,400 anuales.

COSTO DE MANTENIMIENTO DE LAS LAGUNAS ARTIFICIALES (Año)			
Artículos	Cantidad	Costo Unit.	Precio
Agua potable	30,000 m ³	\$ 0.991 m ³	\$ 28,739.13
Operarios	5	\$ 5.797 día	\$ 10,579.71
Bomba hora	2	\$ 3.949 día	\$ 1,441.73
Pérdida alquiler botes	1 veces semana/año	---	\$ 1,159.42
			\$ 41,919.00
		Ingeniería y Supervisión	\$ 14,400.00
		TOTAL	\$ 56,319.99

TABLA No. 1 COSTO DE MANTENIMIENTO DE OPERACIÓN

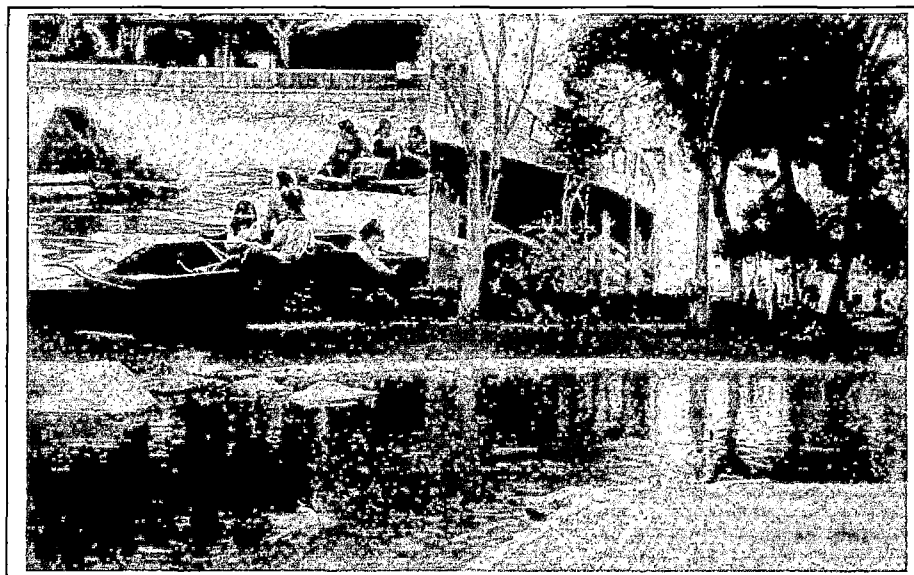


FIGURA 6. LAGUNA ARTIFICIAL – PARQUE DE LA EXPOSICIÓN

10. Toma de muestra y análisis microbiológicos

Las técnicas de muestra y análisis de agua fueron tomados y analizados por la “Dirección Municipal de Salud y Bienestar Social” como Programa de Estudio de Evaluación de agua del Cercado de Lima a solicitud de la administración en el Parque de La Exposición. (Ver resultados Cuadro 1, 2, 3)

3.3.2.2 METODOLOGIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS EN LAS LAGUNAS ARTIFICIAL - PARQUE DE LA EXPOSICIÓN

El propósito metodológico consiste en lo siguiente:

1. Sistema biológico (Plantas acuáticas)

El principio metodológico consiste en la aplicación de un sistema biológico pasivo que incluye la depuración del agua en humedales artificiales, previamente habilitadas (Roca, arena gravosa, material impermeable, etc.), la vegetación seleccionada para el presente proyecto es de la especie (*Phragmites Australis*), propio de nuestra región.

Los principales hechos para el tratamiento de aguas residuales en las zonas de las raíces son:

- a) El agua residual es tratada por actividad microbiológica.
- b) El oxígeno atmosférico es suministrado a través del tronco y de las rizomas de las plantas acuáticas.
- c) Las rizomas de las plantas acuáticas proporciona un camino hidráulico a través de la rizosfera a lo largo de las cuales puede fluir el agua residual.

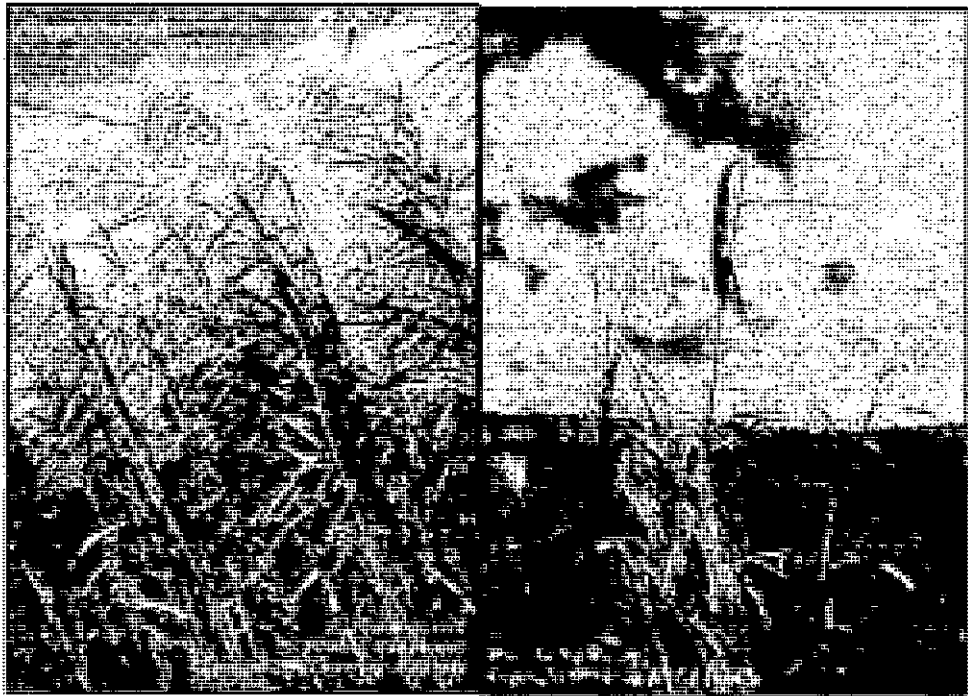


FIGURA 7. PHRAGMITES AUSTRALIS

2. CONDICIONES HIDRÁULICAS

Consiste en la recirculación del agua impulsada mediante una bomba hidráulica de 1 Hp de capacidad hacia un desnivel de cabeza hidráulica razonable cuyo flujo hídrico y caudal llegue hacia el humedal diseñado para el reciclaje del agua.

La geometría (largo, ancho, profundidad), caudal de diseño y el tiempo de retención hidráulica se verifica en el Capítulo VI.

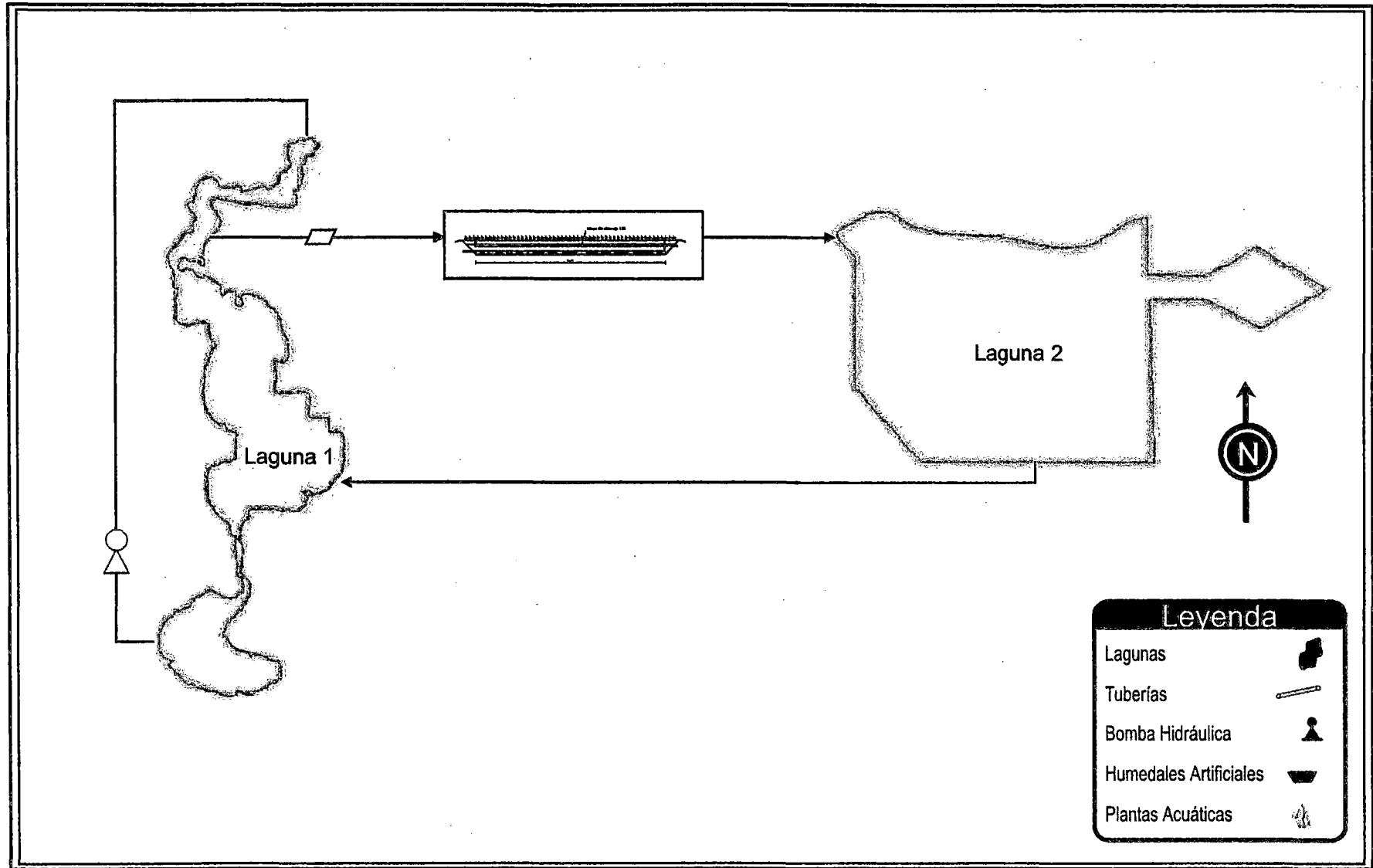


FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

CAPITULO IV

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El Parque de la Exposición se encuentra ubicado en el cercado de Lima entre las coordenadas geográficas $10^{\circ}16'18''$ y $13^{\circ}19'18''$ de latitud Sur y $75^{\circ}30'42''$ y $77^{\circ}53'03''$ de longitud Oeste. Tiene una altitud de 154 msnm, cuenta con una superficie total de $140,000 \text{ m}^2$.

Sus límites son:

- Por el Norte : La Av. Inca Gracilazo de la Vega con Paseo Colón
- Por el Este : La Av. 28 de Julio
- Por el Sur : Paseo de la República

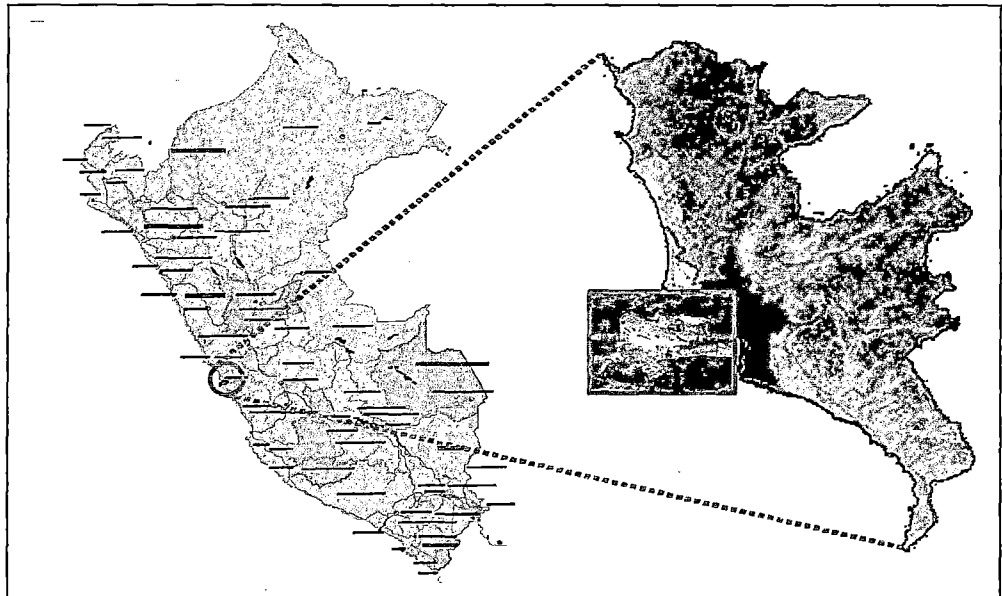


FIGURA 9. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL PARQUE DE LA EXPOSICIÓN

4.2 AMBIENTE FÍSICO

El clima es árido con una precipitación anual de 27 mm a 65 mm. La temperatura máxima alcanza de Febrero a Marzo alrededor (28°C) y la mínima de Julio a Agosto alrededor de (14°C), la humedad promedio durante el año es de 85% con una máxima de 95% entre Julio y Agosto y un mínimo de 75% entre Diciembre y Enero.

4.3 SITUACIÓN ACTUAL

4.3.1 PARQUE DE LA EXPOSICIÓN

En 1999 el Parque de la Exposición fue intervenida por la gestión municipal del **Dr. ALBERTO ANDRADE CARMONA**, para la recuperación de la infraestructura del Parque y la construcción de nuevas obras, siendo inaugurada el 17 de Enero del 2000, con el nombre de Gran Parque de Lima y con el Alcalde actual **Dr. LUIS CASTAÑEDA LOSSIO**, restituye el nombre original del Parque de la Exposición.

4.4 AMBIENTE CULTURAL

4.4.1 SÍNTESIS HISTÓRICA DEL PARQUE DE LA EXPOSICIÓN

La ciudad de Lima da sus primeros pasos de transformación durante el gobierno del Presidente José Balta. Uno de estos primeros pasos; la modernización de la ciudad, fue la creación del Parque de la Exposición. Así, el 2 de agosto de 1869, el Presidente José Balta, emite un decreto por el, cual se crea el Palacio de la Exposición *"Para exhibir muestras de las diferentes disciplinas del quehacer humano, tanto en ciencias como en arte, que ya circulaban por el mundo y eran desconocidas en el Perú"*, con carácter permanente y para lo cual se adquiere parte del fundo Santa Beatriz y calles de acceso.

El 10 de septiembre el Presidente Balta, nombra una comisión, quedando las obras bajo la dirección del General Manuel Ignacio de Vivanco, Antonio Raymondi, Manuel Pardo, Julio Zarácondegui, Juan de Oviedo, Ramón Azcarate, Juan Antonio Rivero, Manuel Atanasio Fuentes y como Ingeniero Consultor Enrique Meiggs.

En 1870, el proyecto comprendió la edificación del Palacio de la Exposición, con sus dependencias auxiliares (Pabellón Bizantino, El Pabellón Morisco y la creación de jardines y arboledas en el resto de la extensión considerada). Para tal caso se importan de Inglaterra, ventanas, columnas fundidas y rejas de fierro para los cercos y quioscos (templete de estilo oriental y comúnmente abierto por todas los lados).

En 1878 el día 28 de julio, el conjunto de obras de la Exposición son terminados, incluso se coloca el famoso reloj del inventor Pedro Ruiz Gallo y el monumento a Cristóbal Colón, que fue trasladado de la Plaza Santa Ana y es inaugurado por el Presidente Mariano Ignacio Prado.

Durante la ocupación chilena, este parque y el Palacio se convirtieron en cuartel general del ejército enemigo y el hermoso parque sirvió para guardar y alimentar a los caballos del enemigo.

El 3 de Enero de 1898, con el propósito de unir la Avenida Grau con la Avenida Alfonso Ugarte, se procedió, a cortar el parque, para formar la arteria que recibe el nombre de Paseo Colón o Avenida 9 de Diciembre. Al cortarse el Parque quedaron dos grandes parcelas una de ,54,000 m² y la otra de 140,000 m² en la cuál se encuentran "El Palacio y las demás edificaciones y la otra parcela quedó transformada en El Parque Neptuno.

En 1909, por escritura del 11 de marzo, el gobierno tomó en arrendamiento por 25 años los Parques de la Exposición, con el objeto de establecer en ellos un jardín botánico y un zoológico.

La influencia europea se reflejó en el Parque de la Exposición y sus edificios aledaños. Se puede decir que este conjunto deriva de los jardines palaciegos o cortesanos del siglo XVIII, con sus lagos, fuentes, rincones pintorescos y pequeños edificios que asemejan a la antigüedad clásica de oriente. Este parque tuvo pintoresca jardinería, un lago con una isla a la que se llegaba por un puente de tipo japonés, pabellones venecianos, bizantinos y arcos de triunfo romanos.

CAPITULO V

BASES CIENTÍFICAS PARA EL DISEÑO Y USO DE PLANTAS ACUÁTICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

5.1 FUNDAMENTO

Los humedales artificiales juegan un papel importante en sustituir tecnologías costosas para el tratamiento de aguas residuales. Biológicamente, los sistemas de plantas acuáticas, son mucho más diversas que los sistemas de tratamiento mecánico. Los diques de oxidación y otros tipos de tratamiento de aireación extendida usan energía intensiva en aereadores mecánicos para suministrar gran cantidad de oxígeno para el crecimiento de microorganismos aerobios, los cuales tratan el agua residual.

En la figura 10 muestra la interrelación de las plantas y microorganismos, para el tratamiento de aguas residuales en un sistema vascular de plantas acuáticas, es la asociación simbiótica entre las plantas y los microorganismos como se indica en la figura 12 donde la mayor parte de los procesos de tratamiento para la degradación de compuestos orgánicos es la actividad de microorganismos que viven en y alrededor de las raíces de las plantas acuáticas, en muchos casos, forma una relación simbiótica con las plantas superiores.

En la figura 11 ilustra la transformación del carbono donde las plantas, el suelo y los microorganismos tienen una relación estrecha. Unos y otros interactúan dando las cualidades que lo caracterizan, esta interdependencia queda de manifiesto en el proceso de transformación de los compuestos orgánicos del agua residual.

En la figura 12 se esquematiza el proceso de transformación del azufre, en especial la compleja relación entre las plantas, los microorganismos, el suelo y el contaminante.

En la figura 13 se puede observar los principales procesos de transformación del fósforo mediante la adsorción, precipitación química y la asimilación por parte de las plantas.

La figura 14 ilustra la transformación del nitrógeno, e implica una serie de procesos y reacciones complejas dependiendo de la forma en que está, presentes en el agua residual.

En forma general la relación de las plantas y los microorganismos produce un efecto sinérgico que trae como resultado un incremento en la velocidad de degradación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales, durante la degradación microbiana de los compuestos orgánicos, producen metabolitos estos productos de la degradación microbiana son absorbidas y utilizadas mas adelante como una fuente alimenticia por las plantas, conjuntamente con N, P, K y otros minerales. A su vez los microorganismos usan metabolitos liberados a través de las raíces de las plantas como una fuente de alimento.

Las cargas eléctricas asociadas con las plantas acuáticas, también reaccionan con cargas opuestas sobre las partículas coloidales de las plantas acuáticas donde son removidos de la corriente de aguas y lentamente digeridos y asimilados por los microorganismos. Las plantas acuáticas tienen la habilidad única de traslocar oxígeno de la parte aérea de la planta hacia las raíces, produciéndose una zona aerobia alrededor de la raíces (Wolverton,1884) (Adaptado de Reddy y Patriac. 1984).

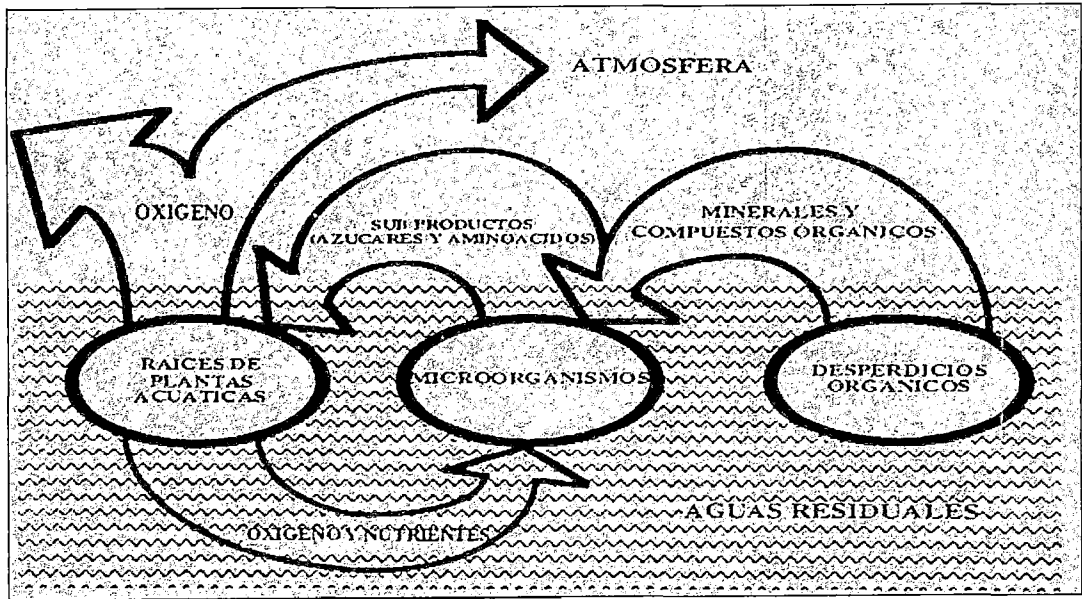


FIGURA 10. EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN HUMEDALES ARTIFICIALES USA PROCESOS NATURALES QUE INVOLUCRAN PLANTAS Y MICROORGANISMOS. (WOLVERTON, 1988)

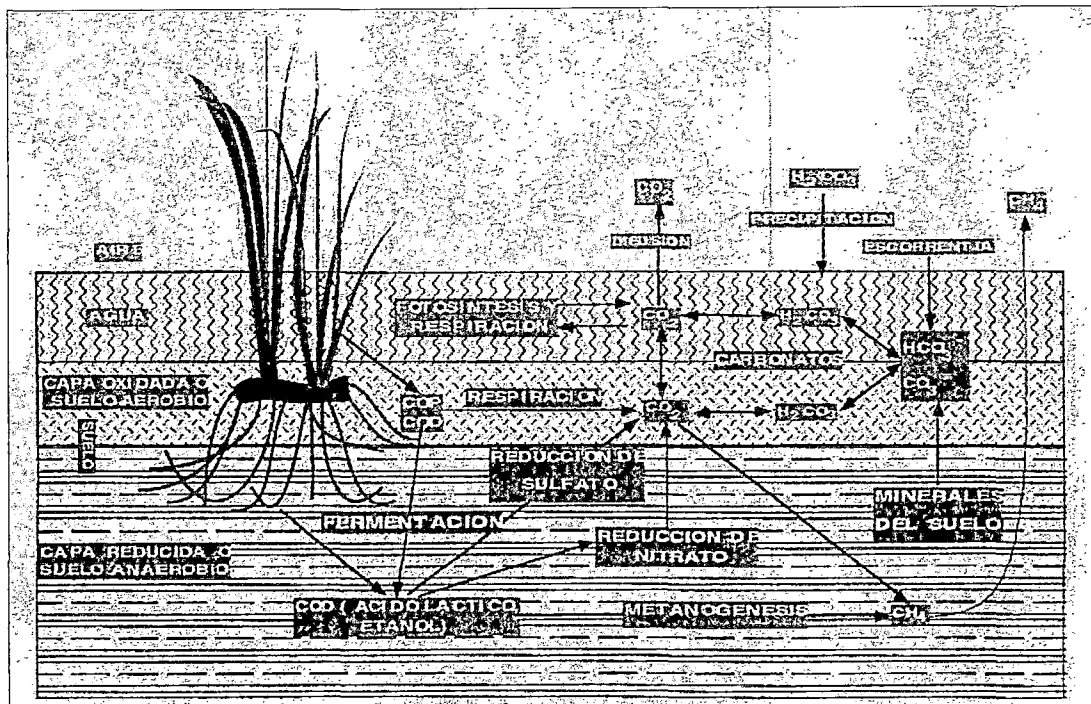


FIGURA 11. TRANSFORMACIÓN DEL CARBONO EN LOS SUELOS DE LOS HUMEDALES (MITSCH Y GOSELINK, 1986)

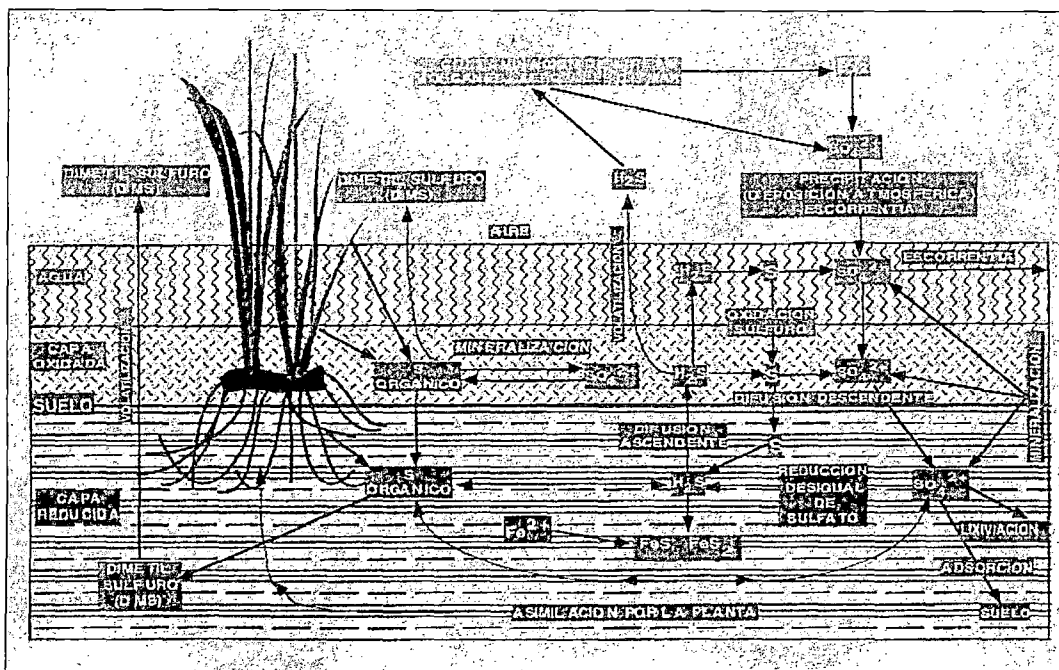


FIGURA 12. TRANSFORMACIÓN DEL AZUFRE EN LOS SUELOS HUMEDALES (MITSCH Y GOSSELINK, 1988)

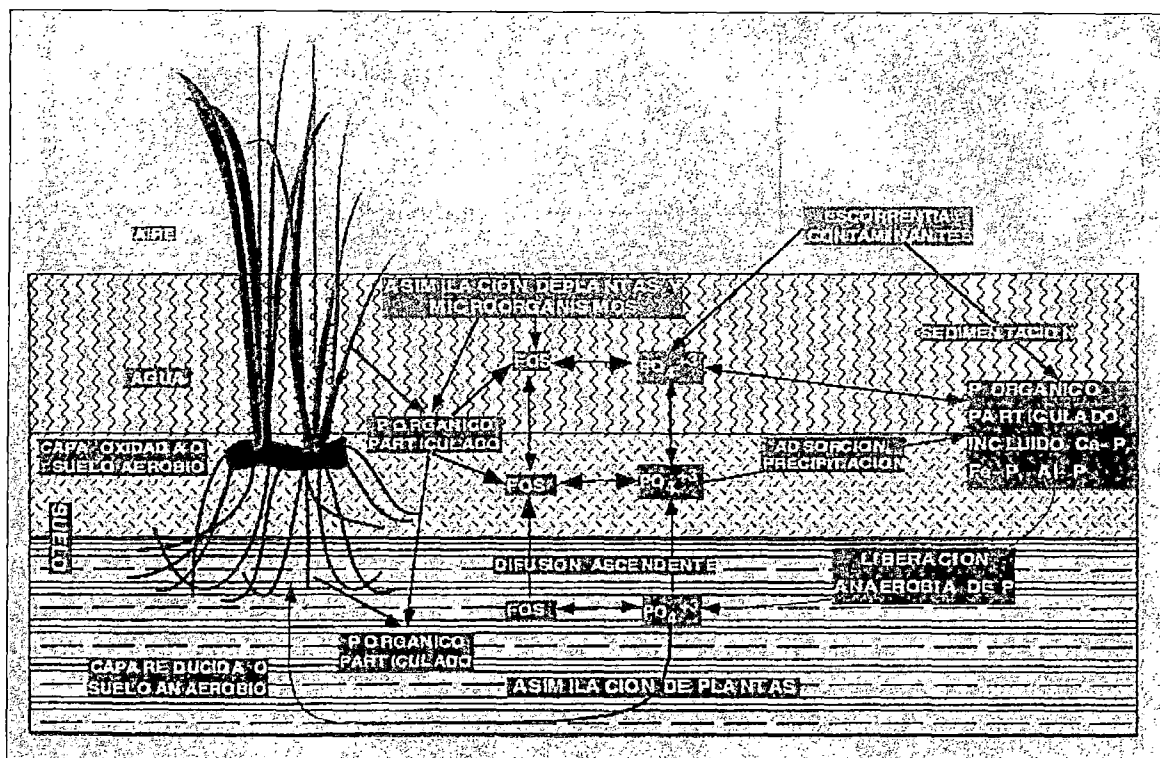


FIGURA 13 TRANSFORMACIÓN DEL FÓSFORO EN HUMEDALES (MITSCH Y GOSSELINK, 1986)

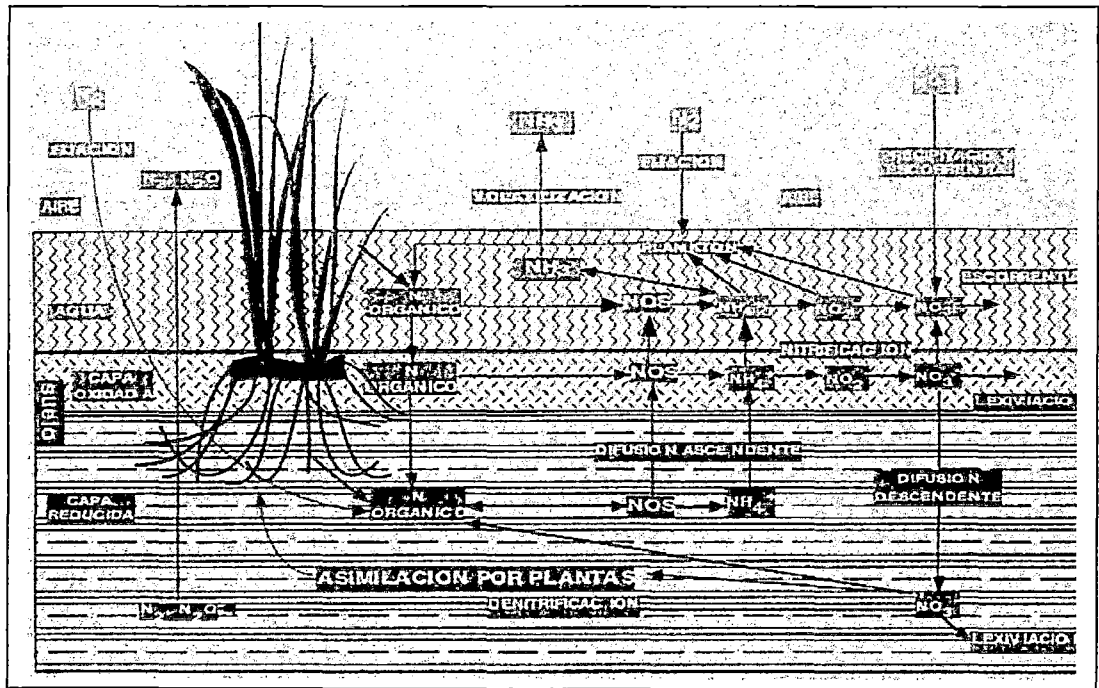


FIGURA 14 TRANSFORMACIÓN DEL NITRÓGENO EN HUMEDALES
(MITSCH Y GOSSELINK, 1986)

5.2 EFECTIVIDAD DEL SISTEMA ARTIFICIAL

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son los antes citados, e incluyen sedimentación, precipitación química, absorción, e interacción biológica con la DBO_5 y el nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. Si no se practica la poda, se encuentra una fracción de la 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 refractaria se considera que son eliminados permanentemente del sistema.

En la siguiente figura 15 se pueden ver los principales procesos que se llevan a cabo en un humedal y que permiten la depuración del agua residual.

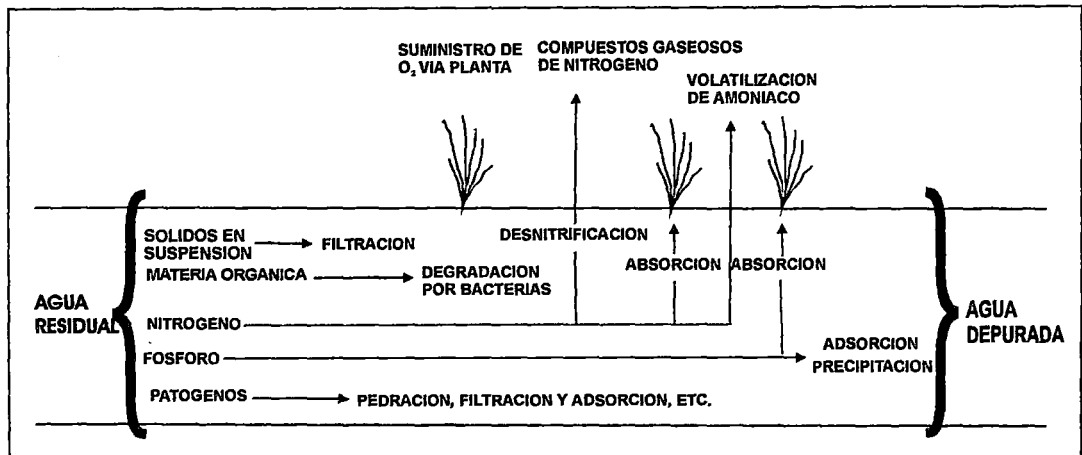


FIGURA 15. PROCESOS DE DEPURACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

En la Figura 16 se pueden ver los valores típicos de concentraciones de entrada y salida de un sistema de humedales artificiales (Experiencia a escala piloto con un sistema tipo SFS, cerca de Sidney, Australia). El análisis de la figura revela que los sistemas de plantas emergentes sembradas sobre arena gruesa pudieron reducir de forma significativa los SS, la DBO₅, y el nitrógeno. La remoción de fósforo es baja, lo cual es consistente con las experiencias de otros investigadores con sistemas basados en piedra y arena.

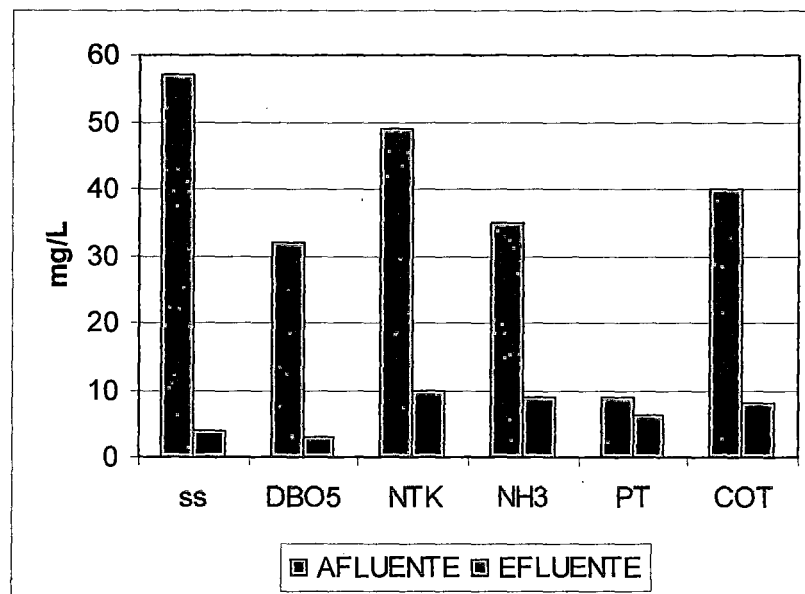


FIGURA 16. RENDIMIENTOS DE REMOCIÓN TÍPICOS.
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

5.2.1 REMOCIÓN DE DBO

En los sistemas de humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la deposición y filtración en los SFS, donde cerca del 50% de la DBO₅ aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aeróbica o anaeróbicamente, dependiendo del oxígeno disponible. El resto de la DBO₅ se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema. Esta actividad biológica puede ser aeróbica cerca de la superficie del agua en los FWS y cerca de las raíces y rizomas en los SFS, pero la descomposición anaerobia prevalece en el resto del sistema.

La Figura 17 ilustra la DBO₅ a la entrada contra la DBO₅ a la salida para sistemas de humedales en Norte América recibiendo agua residual de variada calidad, desde primaria hasta terciaria. Todos los valores del efluente están por debajo del nivel de referencia de 20mg/l, y esto puede lograrse sin tener en cuenta la concentración de la entrada (dentro del rango mostrado). Datos de los sistemas similares en Europa muestran esencialmente la misma relación para concentraciones de DBO₅ a entradas superiores a 150 mg/l.

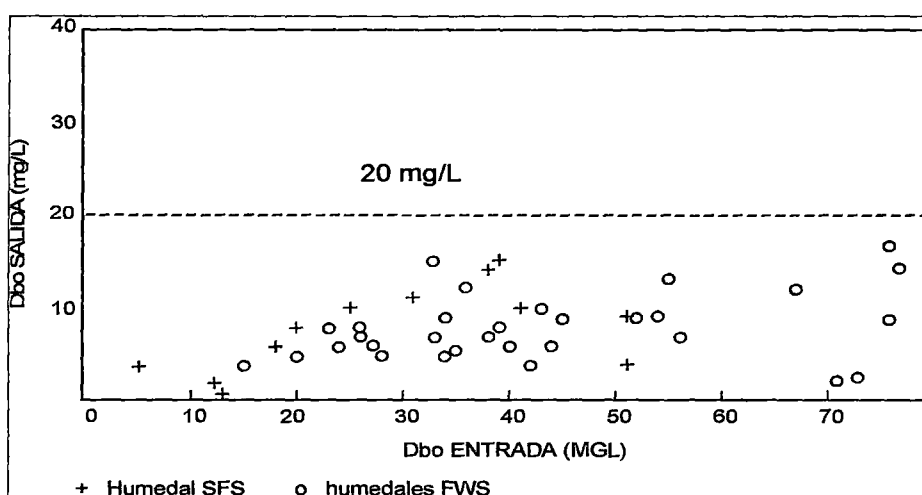


FIG. 17. DBO₅ ENTRADA CONTRA DBO₅ DE SALIDA EN HUMEDALES ARTIFICIALES EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

En climas relativamente cálidos, la remoción de DBO_5 observada durante los primeros días es muy rápida y puede ser razonablemente aproximada a una relación de flujo a pistón de primer orden. La remoción subsiguiente está más limitada y se cree que esta influida por la producción de DBO_5 residual debida a la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal. Esto hace a estos sistemas únicos, ya que se produce DBO_5 dentro del sistema y a partir de fuentes naturales, por tanto, no es posible diseñar un sistema para una salida de cero DBO_5 , independientemente del tiempo de retención hidráulica. En términos generales la DBO_5 del efluente puede estar entre 2 y 7mg/L, lo que explica los valores bajos, en la porción inferior izquierda del gráfico.

5.2.2 REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

La remoción de sólidos suspendidos es muy efectiva en los dos tipos de humedales artificiales, produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 20 mg/L que es el valor de referencia. Este comportamiento se puede ver en la Figura 18 que muestra datos de sólidos suspendidos a la entrada contra la salida en humedales artificiales.

Al igual que ocurre con la remoción de DBO_5 , se alcanzan valores siempre por debajo del valor de referencia, independientemente de la concentración de entrada. Solamente una instalación del tipo SFS sobrepasó este valor, debido a un cortocircuito causado al presentarse flujo superficial, con lo que el efluente alcanzó una concentración de 23 mg/L. En esta figura se usaron datos de las mismas instalaciones que en la Figura 17.

La remoción de sólidos en humedales es más o menos rápida, y se estima que ocurre en gran parte entre el 12 al 20 % inicial del área.

En el diseño de humedales del tipo SFS, es importante tener en cuenta las posibles obstrucciones parciales del substrato. Esto ocasionaría una reducción de la conductividad hidráulica del medio, que resultaría en un flujo superficial que como

es lógico no es acorde con las condiciones de diseño y el adecuado funcionamiento del sistema. Estas obstrucciones se presentan principalmente en instalaciones que tienen la entrada del agua sumergida, por lo que es recomendable que siempre se coloque sobre la superficie del medio.

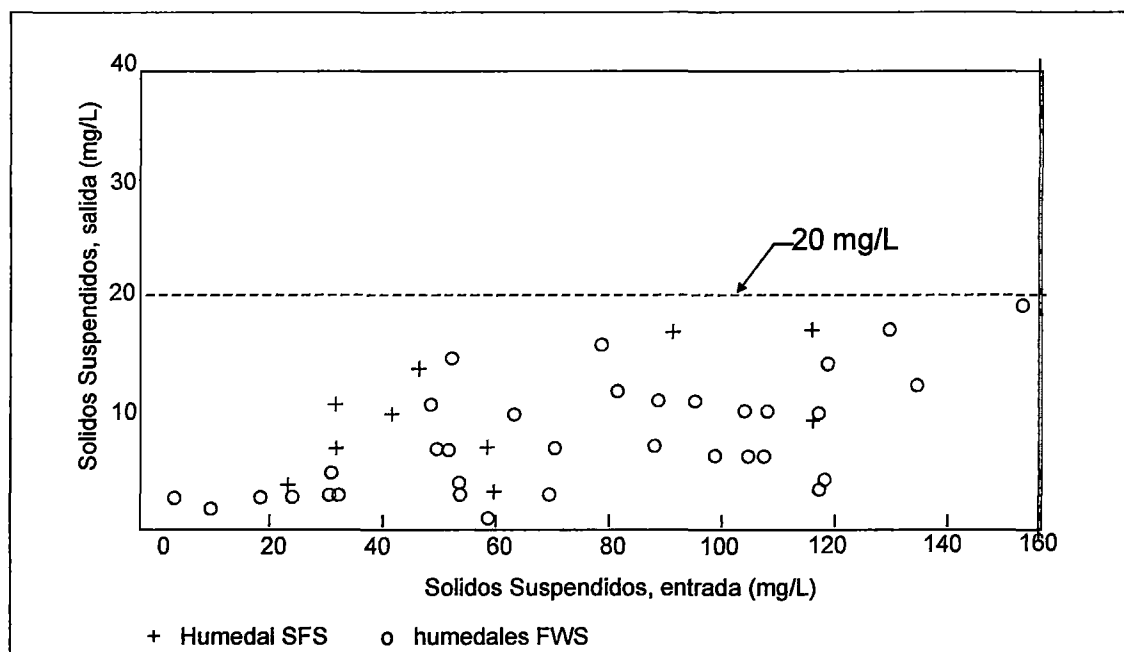


Fig. 18. SÓLIDOS SUSPENDIDOS ENTRAD-SALIDA EN HUMEDALES ARTIFICIALES EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

No se cuenta con un modelo cinético de remoción de sólidos suspendidos, pero las investigaciones indican que sigue el mismo patrón que la DBO_5 . De forma que cuando se diseña un sistema para la remoción de una concentración particular de DBO_5 , se puede esperar una remoción de sólidos suspendidos comparable, siempre y cuando se mantengan las condiciones de flujo de diseño.

5.2.3 REMOCIÓN DE NITRÓGENO

La remoción de nitrógeno puede ser muy efectiva en ambos tipos de sistemas de humedales artificiales y los principales mecanismos de eliminación son similares para los dos casos. Aunque ocurre la asimilación de nitrógeno por parte de las plantas, solo una pequeña fracción del nitrógeno total puede ser eliminada por esta

vía. Experiencias en Norteamérica demuestran que solamente entre el 10 y el 15% del nitrógeno eliminado se retira del sistema usando la poda de las plantas. La remoción de nitrógeno en humedales puede alcanzar valores por encima del 80%.

Puede medirse el nitrógeno que entra en sistemas de humedales como nitrógeno orgánico y amoniacal [la combinación de estas dos se representa como Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)], nitrito y nitrato.

En los sistemas de humedales, el potencial de remoción del nitrógeno puede tomar varios años en desarrollarse, por lo menos se requieren dos o tres etapas del crecimiento de las plantas, sistemas de raíces, capa de residuos, y materiales del bentos, para alcanzar el equilibrio.

Los tanques sépticos, sistemas del tratamiento primarios, y efluentes de lagunas facultativas normalmente no contienen nitratos, pero pueden tener niveles significantes de N orgánico y amoniacal. Durante los meses de verano calurosos, las lagunas facultativas pueden tener niveles bajos de N amoniacal en el efluente, pero a menudo contienen altas concentraciones de N orgánico asociadas con las algas que salen con el efluente. Los efluentes de sistema de tratamiento secundarios aireados tienen niveles bajos de N orgánico típicamente pero contienen concentraciones significantes de N amoniacal y nitratos. Los sistemas con intensidad alta o aireación prolongada pueden tener la mayoría del nitrógeno en forma de nitrato.

El N orgánico que entra en un humedal esta típicamente asociado con materia particulada como sólidos orgánicos del agua residual y/o algas. La remoción inicial de estos materiales como sólidos suspendidos es más o menos rápida. Mucho de este N orgánico sufre descomposición o mineralización y descarga entonces nitrógeno en forma amoniacal al agua. También pueden ser una fuente de N, los detritos de las plantas y otros materiales orgánicos producidos naturalmente en el humedal, produciendo una descarga estacional de amoníaco. Una aproximación conservadora al diseño, sería asumir que la mayor parte de NTK que entra al sistema, está en forma de nitrógeno amoniacal.

Se cree que la mejor forma para remover el amoniaco en ambos tipos de humedales artificiales es la nitrificación biológica seguida por desnitrificación. La oportunidad de nitrificar existe cuando se tienen condiciones aeróbicas, se tiene la suficiente alcalinidad y la temperatura adecuada, y después de que la mayoría de la DBO ha sido removida, para que los organismos nitrificantes puedan competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible.

La experiencia ha demostrado que la condición limitante para la nitrificación en los humedales es la disponibilidad de oxígeno. La relación teórica indica que son necesarios 4,6 g de oxígeno para oxidar 1 g de nitrógeno amoniacal.

En la Figura 19 compara entrada y salida de amoniaco en los mismos sistemas de humedales artificiales de los gráficos anteriores. La línea inclinada que cruza el gráfico indica el momento en que la entrada y la salida de amoniaco son iguales, es decir, una remoción de cero en el sistema. Los puntos que se encuentran por encima de la línea indican que existe una producción neta de amoniaco dentro del sistema. La fuente de este amoniaco extra se cree que es la mineralización del nitrógeno orgánico en el humedal, combinado con una insuficiencia de oxígeno e inadecuadas condiciones aeróbicas requeridas para la nitrificación con los tiempos de retención hidráulica de dichos sistemas.

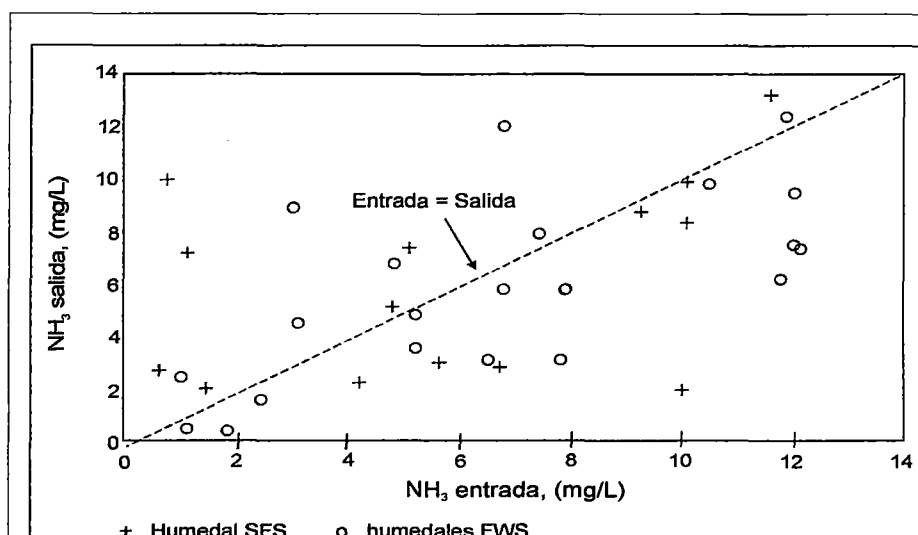


FIGURA 19. ENTRADA DE AMONIACO CONTRA SALIDA DE AMONIACO EN HUMEDALES ARTIFICIALES EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

La disponibilidad de oxígeno esta relacionada con la eficiencia en la transferencia de oxígeno atmosférico en los humedales tipo FWS y con el alcance de la penetración de las raíces y la eficiencia en la transferencia de oxígeno de estas raíces en el caso de los SFS. Por tanto, es de gran importancia si se quiere tener una buena eficiencia en el proceso de nitrificación que a la hora de diseñar humedales de flujo subsuperficial se hagan con una profundidad igual a la potencial penetración de las raíces. Cualquier flujo bajo la zona de las raíces será anaeróbico y la nitrificación en esta zona no será posible. En climas o estaciones cálidas serán necesarios tiempos de retención hidráulica de 6 a 8 días para lograr los niveles de nitrificación deseados.

La remoción de amoníaco es también dependiente de la temperatura. Durante los meses de verano la remoción es bastante buena, pero decrece a medida que baja la temperatura, siempre dependiendo de la temperatura del agua.

La alcalinidad es necesaria para dar lugar a las reacciones biológicas de nitrificación. Está teóricamente aceptada para diseño una relación de 7.1 g de alcalinidad (como CaCO_3) por cada gramo de NH_4^+ - N oxidado. Es prudente ser un poco conservador y usar 10g de alcalinidad por cada gramo de nitrógeno amoniacal a causa de las pérdidas externas. Típicamente las aguas residuales municipales deben tener alcalinidad suficiente, pero puede ser necesaria una adición extra para lograr niveles verdaderamente bajos de amoníaco y para algunas aguas residuales industriales con baja alcalinidad. Más o menos la mitad de la alcalinidad puede ser removida cuando el nitrato producido es biológicamente reducido por desnitrificación.

La remoción de nitratos (NO_3) por vía de una desnitrificación biológica en humedales, requiere condiciones anoxicas, una adecuada fuente de carbono y condiciones adecuadas de temperatura. La presencia de condiciones anoxicas esta casi garantizada en muchos humedales artificiales y la temperatura del agua depende del clima local y de la estación, así que la disponibilidad de una fuente adecuada de carbono tiende a ser el factor que controla el proceso. Metano y otras fuentes de carbono fácilmente degradables son usadas comúnmente en procesos

convencionales de desnitrificación, pero esta solución no es aplicable desde el punto de vista de los costos a los humedales, así que la desnitrificación dependerá de los organismos presentes en el agua residual o que se encuentren de forma natural en el humedal.

Se dijo antes que para la nitrificación se requiere que se elimine previamente mucha de la DBO_5 , así que puede que la disponibilidad original de carbono orgánico ya no exista en el momento de la desnitrificación. Se estima que entre 5 y 9 g de DBO_5 se requieren para desnitrificar 1 g de $NO_3 - N$.

En la Figura 20 se compara entrada y salida de nitratos en los mismos sistemas de humedales artificiales de los gráficos anteriores.

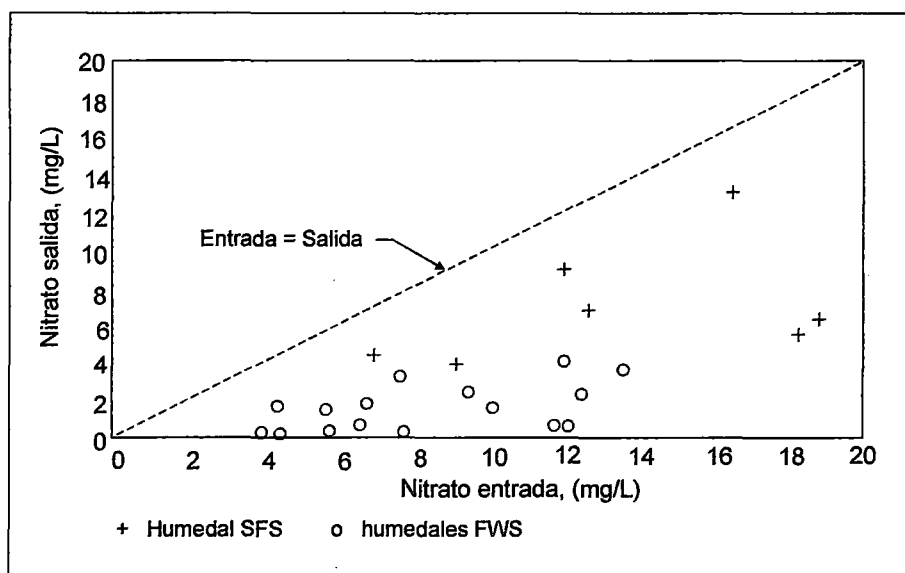


FIG. 20. NITRATOS ENTRADA-SALIDA DE NITRATOS EN HUMEDALES ARTIFICIALES.

EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

La otra gran fuente de carbono en los humedales son los residuos de las plantas y otros organismos naturales presentes en el bentos. Si las condiciones de temperatura son favorables, esto podría ser suficiente para una desnitrificación total, para cargas orgánicas y de nitrógeno usadas típicamente en los humedales. Los sistemas de flujo libre tienen una ventaja en este apartado, ya que la caída de hojas sobre el agua hace que sean susceptibles de tener una descomposición más rápida,

comparada con los sistemas de flujo subsuperficial donde estos residuos yacen sobre la superficie del medio.

5.2.4 REMOCIÓN DE FÓSFORO

La remoción de fósforo en la mayoría de los sistemas de humedales artificiales no es muy eficaz debido a las pocas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno. Algún trabajo experimental ha usado arcilla expandida y adición de óxidos de hierro y aluminio; algunos de estos tratamientos pueden ser prometedores pero las expectativas a largo plazo no se han definido aún. Algunos sistemas en Europa usan arena en lugar de la grava para aumentar la capacidad de la retención del fósforo, pero este medio requiere instalaciones muy grandes, debido a la reducida conductividad hidráulica de la arena comparada con la grava. Si una importante remoción de fósforo es requisito del proyecto, entonces se necesitará un área de terreno muy grande o métodos de tratamiento alternativos.

La Figura 21 presenta la entrada y la salida de fósforo para los sistemas de las figuras anteriores donde los datos están disponibles.

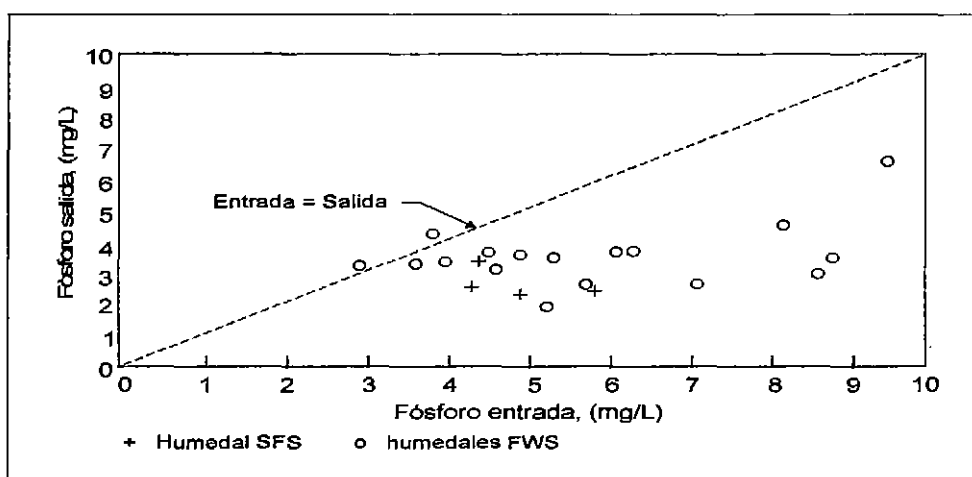


FIG. 21. ENTRADA CONTRA SALIDA DE FÓSFORO EN HUMEDALES ARTIFICIALES. EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

La línea inclinada en la figura representa la condición donde la entrada iguala la salida, rendimiento cero. Cuatro de los puntos están un poco por encima de la línea punteada, pero la mayoría indican una remoción de entre el 30 y el 50%. Puede

esperarse que estas eficiencias se mantengan a largo plazo durante todo el periodo de diseño del sistema.

5.2.5 REMOCIÓN DE METALES

Los mecanismos de eliminación de metales en humedales artificiales son similares a los descritos anteriormente para el fósforo, incluyendo asimilación por parte de las plantas, adsorción, y precipitación. Como los sedimentos orgánicos e inorgánicos están aumentando continuamente (a una velocidad lenta) en los humedales, la disponibilidad de sitios de adsorción frescos esta también aumentando. Los dos tipos de humedales artificiales tienen la misma capacidad potencial de remoción de metales y esta capacidad se mantiene durante todo el periodo de diseño del sistema.

Los metales pueden acumularse en los humedales artificiales, pero las concentraciones que normalmente tienen las aguas residuales no representan una amenaza para los valores del hábitat o para los posibles usos a largo plazo

5.2.6 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES

Los humedales artificiales son en general, capaces de una reducción de coliformes fecales de entre uno a dos logaritmos con tiempos de retención hidráulica de 3 a 7 días que en muchos casos no es suficiente para satisfacer los requisitos de la descarga que a menudo especifican $< 200\text{NMP}/100\text{ ml}$. Tiempos de retención superiores a 14 días serían necesarios para lograr reducciones de 3 o 4 logaritmos.

Cuando se presentan eventos intensos de lluvia, los picos de caudal influyen negativamente en la eficiencia de remoción de coliformes fecales. Como resultado, la mayoría de los sistemas utilizan alguna forma de desinfección final. En la instalación antes citada, que cuenta como medio con grava fina de río los coliformes fecales se han reducido de $8 \times 10^4\text{ NMP} /100\text{ ml}$ a $10/100\text{ ml}$ de media.

5.3 COMPONENTES PARA EL DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Los Humedales Construidos es diseñada en forma de una cubeta que contiene sustrato (arena, piedra, etc.), agua, plantas emergentes, que permite manipular durante la construcción del humedal. Otro de los Componentes importantes de los humedales construidos, es el desarrollo natural de los microorganismos y los invertebrados acuáticos.

5.3.1 El Agua

El agua es uno de los componentes principales de los humedales construidos, cuyo diseño conduce al tratamiento de aguas residuales de origen domestico e industrial; aun en circuitos cerrados aumenta un rendimiento efectivo, con las características de un manejo adecuado.

La hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario en el éxito o fracaso del humedal tal como se indica a continuación.

- La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas y, segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

5.3.2 Sustratos, Sedimentos, y Restos de Vegetación

Los sustratos 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 los restos de 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 a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del substrato.
- El substrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.

La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, 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.

5.3.3 Vegetación

Las plantas emergentes más utilizadas de los humedales artificiales incluyen espadañas, carrizos, juncos como se muestra en la figura 22



**FIGURA 22. PLANTAS ACUATICAS TÍPICAS EN HUMEDALES
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)**

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los 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. Lo más importante en los humedales es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos se degradan y se convierten en lo que hemos llamado restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre.

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

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua 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 sustrato.
- 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.

5.3.4 Microorganismos

Una característica fundamental 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 o insolubles.
- Altera las condiciones de potencial redox del substrato y así afecta la capacidad de proceso del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

Algunas transformaciones microbianas son aeróbicas (es decir, requieren oxígeno libre) mientras otras son anaeróbicas (tienen lugar en ausencia de oxígeno libre). 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 se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan y puede permanecer inactivo 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 sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales.

5.4 CONDICIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL HUMEDAL

Los aspectos más importantes a tener en cuenta para la construcción de humedales son básicamente, la impermeabilización de la capa subsuperficial de terreno, selección y colocación del medio granular para el caso de los sistemas SFS, el establecimiento de la vegetación, y por último las estructuras de entrada y salida.

5.4.1 Impermeabilización

Los dos tipos de humedales generalmente requieren que se coloque una barrera impermeable para impedir que se contamine con agua residual el subsuelo o el agua subterránea. Algunas veces está presente naturalmente por una capa de arcilla o los materiales que se encuentran in-situ y que pueden ser compactados hasta un estado cercano al impermeable. Otras posibilidades son los tratamientos químicos, una capa de bentonita, asfalto o algún tipo de membrana.

El fondo del humedal debe ser cuidadosamente alisado antes de la colocación del impermeabilizante, sobre todo si éste es del tipo de alguna fibra sintética, que pueda llegar a perforarse. Los dos tipos de humedales deben tener una ligera pendiente para asegurar el drenaje, de forma que se asegure que se proporcionaran las condiciones hidráulicas necesarias para el flujo del sistema. El gradiente hidráulico que se requiere y el control del nivel de agua en cada celda se realiza con el dispositivo de salida que debe ser regulable. Para este efecto en la figura 23 se ilustra un tipo de dispositivo de salida.

La membrana impermeabilizante, si se usa, debe colocarse directamente en la totalidad de la superficie de la celda. El medio granular, en el caso de los humedales SFS, será colocado directamente sobre la membrana que debe tener las propiedades mecánicas necesarias para soportarlo sin llegar a perforarse.

5.4.2 Densidad de la vegetación

En la construcción de los de humedales, es de vital importancia establecer la vegetación en la densidad apropiada, seleccionadas de pantanos locales que estén adaptadas a las condiciones climáticas de la región.

Aunque la siembra se puede hacer a partir de semillas, este método requiere bastante tiempo y un control estricto del agua. Adicionalmente presenta el problema del posible consumo de semilla por parte de los pájaros, por lo que lo más

aconsejable es plantar a partir del trasplante de rizomas al lecho previamente preparado.

5.4.3 Estructura de salida y entrada

El sistema, SFS, requieren condiciones de flujo uniformes para alcanzar los rendimientos esperados. Esto se alcanza en sistemas de pequeño o moderado tamaño con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de toda la celda, tanto para la entrada como para la salida.

Un colector de entrada sobre la superficie permite el acceso para ajustes y control, por lo que se prefiere para muchos sistemas. Este colector generalmente consiste en una tubería plástica de 100 a 200 mm de diámetro, con una "t" ubicada sobre la línea, aproximadamente cada 3m. El operario puede mover cada "t" alrededor de un arco vertical y de ese modo puede hacer un ajuste visual e igualar los caudales de cada uno. Los pequeños sistemas SFS incluyen normalmente una tubería perforada colocada en el fondo del lecho y rodeada por material rocoso.

El conducto de salida tanto para los sistemas SFS como para los FWS consiste normalmente en una tubería perforada colocada al final de la celda y en el fondo del lecho. En algunos casos se coloca en una zanja poco profunda, rellena con material rocoso, ligeramente por debajo del fondo de la celda del humedal, para asegurar un drenaje completo.

Los sistemas grandes normalmente tienen estructuras de entrada y salida en concreto. En el caso de las de salida, suelen contar con un dispositivo variable que permita controlar el nivel del agua en la celda del humedal, como el que se muestra en la siguiente figura.

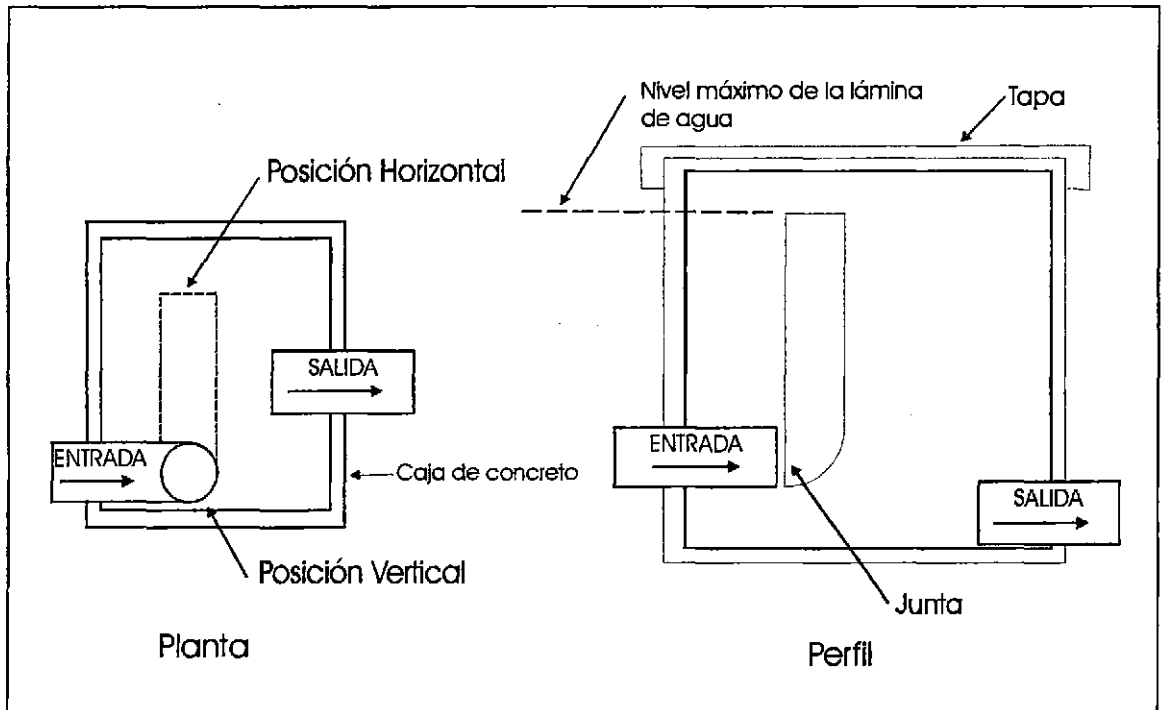


FIGURA 23 ESTRUCTURA DE SALIDA CON CONTROL DE NIVEL
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

TABLA 2.- ESPECIES EMERGENTES MÁS UTILIZADAS EN DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES.
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

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. Eleocharis sp. Scirpus lacustris L.(*)	Junco de laguna	14-32 18-27		20	5-7.5 4-9
Gramíneas	Glyceria fluitans (L.) R. Br. Phragmites australis (Cav) Trin. ex Steudel (*)	Hierba del maná 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

CAPITULO VI

ANÁLISIS MATEMÁTICO

6.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DE HUMEDALES ARTIFICIALES EN SISTEMA FLUJO SUBSUPERFICIAL

Los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de DBO₅ y nitrógeno. Así mismo los principales parámetros de diseño incluyen el tiempo de retención hidráulica, la profundidad y geometría de celdas (ancho y longitud), la carga de DBO₅ y la carga hidráulica.

Los modelos de diseño presentados son los sugeridos por Sherwood C. Reed en su libro *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, y Metcalf & Hedí, INC.

6.2 FORMA DE DISEÑO

6.2.1 Humedad Artificial Tipo Sistema Subsuperficial

La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo a pistón para la determinación del tiempo de retención hidráulica para sistemas de flujo subsuperficial (S.F.S.) diseñados para la eliminación de DBO₅ :

$$\boxed{\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t}} \dots\dots\dots(1)$$

En la ecuación (1) el tiempo de retención (t') se define como el tiempo de retención teórico basado en la porosidad del medio a los huecos intersticiales .

$$t' = \frac{-\ln C_e / C_o}{K_T}$$

Donde:

C_e : Concentración del contaminante en el efluente, mg/l

C_o : Concentración del contaminante en el afluente, mg/l

K_T : Constante de reacción de primer orden se calcula en función de la temperatura, d^{-1}

t : tiempo de retención hidráulica, d

El tiempo de retención hidráulica se puede expresar en función del caudal de diseño y de la geometría del sistema mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{LWyn}{Q} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

L : Largo de la celda del humedal, m

W : Ancho de la celda del humedal, m

Y : Profundidad de la celda del humedal, m

n : Porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La vegetación, los residuos, el medio, raíces y otros sólidos ocupan algún espacio en los humedales del tipo S.F.S. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q : Caudal medio a través del humedal, m^3/d

Así mismo el tiempo de retención es función de la conductividad hidráulica del medio y de la longitud de la celda, relación que se puede expresar de la siguiente forma:

$$t = \frac{L}{K_s \cdot m}$$

Donde:

L = Long del depósito, m

K_s= Conductividad hidráulica

m = Pendiente del depósito, m/m

Puede ser necesario calcular el caudal medio mediante la siguiente expresión, para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual a través del humedal. Un diseño conservador debe asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvia de los registros históricos del lugar, para cada mes de la operación. Es usualmente razonable para un diseño preliminar suponer que los caudales de entrada y salida son iguales.

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2} \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

Q_e: Caudal de salida, m³/d

Q_o: Caudal de entrada, m³/d

Es entonces posible determinar el área superficial del humedal combinando las ecuaciones (1) y (2):

$$A_s = LW = \frac{Q \ln(C_o / C_a)}{K_T y n} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

A_s : Área superficial del humedal, m^2

El valor de K_T para las ecuaciones (1) y (4)

Depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura.

Como las reacciones biológicas del tratamiento dependen de la temperatura, es necesario para un buen diseño, estimar la temperatura del agua en el humedal.

6.2.2 DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo a pistón de un lado a otro a través de a sección del humedal y un mínimo de corto circuito, el diseño hidráulico del humedal es tan importante como los modelos que lo determinan.

En un humedal SFS este concepto es necesario para asegurar que las condiciones de flujo subsuperficial se mantienen en circunstancias normales durante todo el periodo de funcionamiento del sistema. Esto solo es posible a través de un cuidadoso diseño hidráulico.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos, el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los SFS.

La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución en lo referente a la construcción, es proveer al humedal de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de agua.

6.2.2.1 RESISTENCIA DE FLUJO

El flujo de agua en un humedal es descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo en el humedal es descrita por la ecuación (5), depende de la profundidad del agua, de la pendiente de la superficie del agua y de la densidad de la vegetación. La ecuación de Manning también asume flujo turbulento, lo que no es completamente válido pero es una aproximación aceptable.

$$v = \frac{1}{n} y^{2/3} s^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

Donde:

v: velocidad de flujo, m/s

n: coeficiente de Manning, s/m^{1/3}

y: profundidad del agua en el humedal, m

s: gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, m/m

Para los humedales, el número de Manning (n) es función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar según la localización o la estación. La relación está definida por:

$$n = \frac{a}{y^{1/2}} \dots\dots\dots(6)$$

Donde:

a : Factor de resistencia, en $s \cdot m^{1/6}$ siendo los valores típicos:

0.4 $s \cdot m^{1/6}$ para vegetación escasa $y > 0.4$ m

1.6 $s \cdot m^{1/6}$ para vegetación moderadamente densa con profundidades de agua residual de $y = 0.3$ m

6.4 $s \cdot m^{1/6}$ para vegetación muy densa y capa de residuos, en humedales con $y \leq 0.3$ m

En muchas situaciones, con vegetación emergente típica, es aceptable asumir para propósitos de diseño valores de **a** entre (1 y 4) $S \times m^{1/6}$. Sustituyendo la ecuación (6) en la ecuación (5) tenemos.

$$v = \frac{1}{a} y^{7/6} s^{1/2} \dots\dots\dots(7)$$

6.2.2.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO HIDRÁULICO PARA SISTEMAS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

La ley de Darcy, que esta definida en la ecuación (8), describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales tipo SFS usando suelo y arena como medio del lecho. El mayor nivel de turbulencia en el flujo ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa; entonces la ecuación de Ergun es más apropiada para este caso.

La Ley de Darcy no es estrictamente aplicable a los humedales de flujo subsuperficial dadas las limitaciones físicas en el actual sistema. Este asume condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto.

La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en la realidad puede variar por la precipitación, evaporación y filtración; así como por los cortocircuitos en el flujo que pueden llegar a presentarse por una desigual porosidad o mala construcción.

$$v = k_s * s \quad \dots\dots\dots (8)$$

y dado que:

$$v = \frac{Q}{W_y} \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

Entonces:

$$Q = k_s A_c s \quad \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

Q : Caudal promedio a través del humedal, m³/d [(Q_o+Q_e)/2]

k_s : Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m³/m²/d.

A_c: Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m²

s : Gradiente hidráulico o "pendiente" de la superficie del agua en el sistema. m/m

v : Velocidad de "Darcy", la velocidad aparente de flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m/d

La sección transversal se puede determinar utilizando la ecuación (9):

$$A_c = \frac{Q}{k_s S}$$

Sustituyendo y reorganizando los términos es posible desarrollar una ecuación que determine de manera aceptable el ancho mínimo de una celda de humedal SFS que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, partiendo de:

$$s = \frac{(m)(y)}{L} \quad L = \frac{A_s}{W} \quad A_c = (W)(y)$$

Donde:

W: Ancho de una celda del humedal, m

A_s: Área superficial del humedal, m²

L: Longitud de la celda de humedal, m

m: pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal.

y: profundidad del agua en el humedal, m

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{(Q)(A_s)}{(m)(k_s)} \right]^{0.5} \dots\dots\dots(10)$$

El área superficial del humedal(A_s) se determina en primer lugar, usando el modelo de diseño limitante para remoción de contaminantes. La ecuación (10) permite calcular directamente el ancho mínimo absoluto aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Es realmente recomendable tomar un valor de la conductividad hidráulica efectiva (**k_s**) ≤ 1/3 y que (**m**) no sea mayor del 20% para tener un factor de seguridad suficiente contra potenciales atascamientos, efectos de la viscosidad y otras contingencias que pueden llegar a ser desconocidas en el momento del diseño.

Las ecuaciones (9) y (10) son válidas cuando el flujo es laminar a lo largo de los espacios vacíos del medio, es decir, cuando el número de Reynolds es menor a 10. El número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, del tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua, como se muestra en la ecuación (11). En muchos casos N_R será mucho menor de 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy.

$$N_R = \frac{(v)(D)}{\tau} \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

N_R : Número de Reynolds, adimensional

v : Velocidad de Darcy (de la ecuación (8)), m/s

D : Diámetro de los vacíos del medio, (arena gravosa, arena gruesa)
tomarlo igual al tamaño del medio, m

τ : Viscosidad cinemática del agua, m^2/s (Ver Tabla 3)

TABLA 3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Viscosidad dinámica x10³ (N*s/m²)	Viscosidad cinemática x10⁶ (m²/s)
0	999.8	1.781	1.785
5	1000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.102	1.003
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.708	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE LOS MEDIOS PARA HUMEDALES SFS EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

Tipo de material	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k_s ($m^3/m^2/d$)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

6.3 ASPECTOS TÉRMICOS

Las condiciones de temperatura en el humedal afectan tanto a las actividades físicas como a las biológicas en el sistema. Condiciones de bajas temperaturas, podrían conllevar en caso extremo, a la falla física del humedal. Es conocido que las reacciones biológicas responsables de la remoción de DBO_5 , nitrificación y desnitrificación también dependen de la temperatura. No obstante, en muchos casos el rendimiento de remoción de DBO_5 en sistemas de humedales existentes en climas fríos no ha demostrado una relación obvia de dependencia de la temperatura. Esto puede ser causado por el largo tiempo de residencia en estos sistemas tendiente a compensar las bajas relaciones de reacción durante los meses de invierno.

Las constantes dependientes de la temperatura para los modelos de remoción de DBO_5 y nitrógeno, que se presentan más adelante, son necesarias para proporcionar un método fiable de estimación de la temperatura del agua en el humedal para un uso correcto y efectivo de los modelos biológicos de diseño.

6.3.1 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Conocer el estado termal del lecho de un humedal en un momento dado puede ser muy complicado. Allí puede haber pérdidas y ganancias de calor del suelo subyacente, del agua residual fluyendo a través del sistema y de la atmósfera. Los mecanismos térmicos básicos involucrados incluyen conducción de o hacia el terreno, conducción de o hacia el agua residual, conducción y convección de o hacia la atmósfera y radiación de o hacia ella. Las ganancias de calor desde el terreno pueden llegar a ser significativas pero suelen no ser tenidas en cuenta para un diseño más conservador. El modelo simplificado que se presenta más adelante esta basado solamente en las pérdidas por conducción a la atmósfera y es conservador.

La energía ganada por el flujo del agua a través del humedal viene dada por:

$$q_G = (c_p)(\delta)(A_s)(y)(n) \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

q_G : Energía ganada por el agua, J/°C

c_p : capacidad de calor específico del agua, J/kg * °C

δ : densidad del agua, kg/m³

A_s : Área superficial del humedal, m²

y : profundidad del agua en el humedal, m

n : porosidad del humedal (p.e. espacio disponible para el flujo del agua, el resto esta ocupado por el medio (ver Tabla 4 para valores típicos))

El calor perdido por el humedal SFS entero puede ser definido por la ecuación (13):

$$q_L = (T_0 - T_a)(U)(\delta)(A_s)(t) \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

q_L : Energía perdida vía conducción a la atmósfera, J

T_0 : Temperatura del agua que entra al humedal, °C

T_a : Temperatura promedio del aire durante el periodo considerado.

U : Coeficiente de transferencia de calor a la superficie del lecho del humedal, W/m^2

φ : Factor de conversión, 86.400 s/d

A_s : Área superficial del humedal, m^2

t : Tiempo de residencia hidráulica en el humedal

$$U = \frac{1}{\frac{y_1}{k_1} + \frac{y_2}{k_2} + \frac{y_3}{k_3} + \frac{y_4}{k_4}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

Donde:

$k_{(1-n)}$: Conductividad de las capas 1 a n, $W/m^* \text{ } ^\circ C$

$y_{(1-n)}$: Espesor de las capas 1 a, m

La (Tabla 5) presenta los valores de conductividad para materiales que están presentes típicamente en un humedal SFS.

Los valores de conductividad de todos los materiales, excepto el de la capa con restos de vegetación del humedal, han sido bien establecidos y pueden encontrarse en la literatura. El valor para esta capa de restos de vegetación se cree conservador, pero es menor que el que se estableció y debe ser usado con cautela hasta que esté disponible una futura verificación.

TABLA 5. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS COMPONENTES DE HUMEDAL SFS
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL I, No. 1)

Material	k (W/m* °C)
Aire (sin convección)	0.024
Nieve (nueva o suelta)	0.08
Nieve (de largo tiempo)	0.23
Hielo (a 0 °C)	2.21
Agua (a 0 °C)	0.58
Capa de residuos del humedal	0.05
Grava seca (25% de humedad)	1.5
Grava saturada	2.0
Suelo seco	0.8

El cambio de temperatura T_c proveniente de las pérdidas y ganancias definidas por las ecuaciones (12) y (13) puede ser encontrando combinándolas:

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} \dots\dots\dots (15)$$

Donde:

T_c : cambio de temperatura en el humedal, °C

entonces la temperatura del efluente será:

$$T_e = T_0 - T_G \dots\dots\dots (16)$$

La temperatura promedio del agua T_w en el humedal SFS será:

$$\boxed{T_w = \frac{T_0 + T_e}{2}} \dots\dots\dots(17)$$

Esta temperatura se compara con el valor asumido, cuando el tamaño y el tiempo de retención hidráulica del humedal se calcularon para cualquiera de los modelos de remoción, ya sea DBO_5 o nitrógeno. Si estas dos temperaturas no están cercanas, se realizan nuevas iteraciones en los cálculos hasta que converjan.

6.4 MODELO DE DISEÑO PARA LA REMOCIÓN DE DBO_5

En esencia, el mecanismo de remoción de DBO_5 en un humedal SFS es el mismo que para los de tipo FWS. Sin embargo, el rendimiento puede ser mejor en los de flujo subsuperficial ya que tienen un área sumergida mucho mayor que incrementa el potencial de crecimiento de biomasa fija. Un metro cúbico de lecho de humedal que contiene grava de 25 mm puede tener al menos 146 m² de área superficial, además de toda la superficie de las raíces presentes. Un volumen comparable en un humedal FWS podría contener de 15 a 50 m² de área superficial disponible.

$$\boxed{\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t}} \dots\dots\dots(18)$$

$$\boxed{K_T = K_{20}(1.06)^{(T-20)}} \dots\dots\dots(19)$$

$$K_{20} = 0.678d^{-1} \dots\dots\dots(20)$$

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{K_r(y)(n)} \dots\dots\dots(21)$$

El lecho de los humedales SFS contiene en una profundidad típica de alrededor de 0.6m del medio seleccionado. Este, algunas veces, tiene encima una capa de grava fina de 76 a 150 mm de espesor. Esta grava fina sirve para el enraizamiento inicial de la vegetación y se mantiene seca en condiciones normales de operación. Si se selecciona una grava relativamente pequeña, <20mm para la capa principal donde se realizara el tratamiento, la capa fina superior probablemente no será necesaria, pero entonces, la profundidad total deberá incrementarse ligeramente para asegurar que se tenga una zona seca en la parte superior del lecho.

Actualmente en operación en los Estados Unidos tienen profundidades de 0.6 m. Unos pocos, en climas cálidos donde el riesgo de congelación no es significativo, funcionan con 0.3 m de profundidad. Estas bajas profundidades aumentan el potencial de transferencia de oxígeno, pero hacen necesaria un área superficial mayor y se tiene el gran riesgo de la congelación en climas fríos. La profundidad de lecho de 0.6m requiere una operación especial para inducir la penetración deseada de las raíces hasta el fondo. La contribución al tratamiento de la presencia de las raíces y rizomas en el lecho del humedal se demuestra en la siguiente tabla.

TABLA 6. COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS HUMEDALES DE SANTEE (CALIFORNIA, EE.UU.) CON Y SIN VEGETACIÓN. EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

Condiciones del lecho*	Penetración de las raíces (cm)	Calidad del efluente (mg/l)		
		DBO ₅	SST	NH ₃
Scirpus	76	5.3	3.7	1.5
Phragmites	>60	22.3	7.9	5.4
Typha	30	30.4	5.5	17.7
Sin vegetación	0	36.4	5.6	22.1

*Q=3.04 m³/d, TRH=6 d, dimensiones del lecho, L=18.5 m, W=3.5 m, y=0.76 m, el agua es agua residual primaria, DBO₅=118 mg/l, SST=57 mg/l, NH₃=25 mg/l

De esta tabla queda claro que el rendimiento en la remoción de DBO₅, y nitrógeno amoniacal está directamente relacionado con la profundidad de penetración de las raíces. Esta profundidad de penetración se considera el límite potencial de máximo crecimiento, lo que a su vez sugiere que se debe tener el propósito de seleccionar como profundidad de diseño para humedales SFS, una tal, que esté algo más allá de la profundidad potencial de crecimiento de las raíces de la vegetación.

6.5 MODELOS DE DISEÑO PARA LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

La remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en ambos sistemas, de flujo libre, (FWS) y flujo subsuperficial (SFS), se debe a procesos físicos y solo está influida por la temperatura a través de los efectos de la viscosidad en el flujo del agua. Dado que la distancia de sedimentación para la materia particulada es relativamente pequeña y que el tiempo de residencia del agua en el humedal es muy largo, estos efectos de la viscosidad pueden omitirse. La remoción de SST en este tipo de sistemas no es un parámetro limitante en el diseño y dimensionamiento del

humedal, ya que la remoción de SST es muy rápida en comparación con la de DBO₅ o nitrógeno.

Muchos de los sólidos en aguas residuales domésticas municipales e incluso muchas industriales, son de naturaleza orgánica y pueden ser descompuestos con el tiempo, dejando un mínimo de residuos. Un tratamiento primario similar al requerido para la DBO₅, dará un nivel aceptable para este tipo de aguas residuales. La consecuente descomposición de los sólidos que quedan y que, por tanto, pasan al humedal, puede dejar un mínimo de residuos que resultará en un atascamiento pero mínimo.

Para los dos tipos de humedales, se pueden esperar rendimientos en remoción de DBO₅ similares, ya que ambos son muy eficaces en este campo. Aquí también, al igual que con la DBO₅, la remoción de SST esta influida por la producción de materiales orgánicos residuales que pueden aparecer en el efluente final como SST, por tanto, no se debe esperar encontrar menos de 5 mg/l a la salida.

Una regresión lineal de datos obtenidos en humedales de Estados Unidos, proporciona unas ecuaciones que pueden servir para estimar la concentración de SST a la salida del humedal. Estas ecuaciones sirven solamente para realizar la estimación del orden de magnitud de la descarga, pero no como parámetro de diseño, ya que hemos visto que los SST no son un factor limitante en éste.

Para humedales SFS:

$$C_e = C_0(0.1058 + 0.0014(CH)) \dots\dots\dots(22)$$

$$CH = \frac{Q}{A_s} x(b) \dots\dots\dots(23)$$

Donde:

C_e : SST en el efluente, mg/l

C_o : SST en el afluente, mg/l

CH: Carga hidráulica, cm/d

b: factor de conversión. 100 cm/m

Q: Caudal promedio del humedal.

6.6 MODELOS DE DISEÑO PARA REMOCIÓN DE NITRÓGENO

El diseño para remoción de nitrógeno para cualquiera de los dos sistemas, FWS o SFS, es un procedimiento complicado, porque el nitrógeno puede estar presente en una variedad de formas y requiere una serie de condiciones químicas y ambientales para su remoción.

6.7 HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Dado que el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio en los humedales SFS, la reaeración atmosférica es probable que sea significativamente menor a la de los sistemas libres (FWS). Sin embargo, como se describe anteriormente, las raíces y rizomas de la vegetación son capaces de proporcionar micrositios aerobios en sus superficies, así que el agua residual que fluye a través del lecho tiene numerosas oportunidades de contacto con estos lugares aerobios dentro de un medio que por el contrario es anaerobio. Como resultado, en el mismo reactor se tienen condiciones para hacer posible la nitrificación y la desnitrificación. Los dos tipos de reacciones biológicas, nitrificación y desnitrificación, son dependientes de la temperatura, y la velocidad de transferencia de oxígeno a las raíces de las plantas que puede variar con la estación.

La mayor fuente de carbono para posibilitar la desnitrificación es la muerte y descomposición de las raíces y rizomas, los demás detritus orgánicos y la DBO_5 del

agua residual. Estas fuentes de carbono probablemente estén mas limitadas durante la operación inicial en este tipo de sistemas SFS.

Dado que la principal fuente de oxígeno de este tipo de humedales es las raíces de las plantas, es absolutamente esencial asegurar que el sistema de raíces penetrará hasta la totalidad de la profundidad de diseño del lecho. Cualquier agua que fluya por debajo de las raíces estará en un ambiente totalmente anaerobio, y la nitrificación no ocurrirá excepto por difusión en los niveles superiores. Esta respuesta está ilustrada en la (Tabla 6) donde la remoción de amoníaco puede ser relacionada directamente con la profundidad de penetración de las raíces. El lecho que contiene Typha (penetración de las raíces de alrededor de 40% de la profundidad del lecho) obtiene solo un 32% de remoción de amoníaco en comparación con los lechos que tienen Scirpus, que alcanzan 94 % de remoción cuando tienen una penetración completa de las raíces.

6.7.1 NITRIFICACIÓN

No existe un consenso sobre cuánto oxígeno es transferido a la zona de las raíces por cada tipo de planta y, por tanto, no se sabe a ciencia cierta cuánto oxígeno está disponible en la superficie de las raíces para la actividad biológica. Algunas publicaciones estiman un rango de 5 a 45 g O₂/m²*d de área superficial de humedal. La demanda de oxígeno de la DBO₅ del agua residual y otras materias orgánicas presentes en el agua pueden utilizar gran parte de este oxígeno disponible, pero basados en los datos de remoción de amoníaco en Santee (Tabla 7) se tiene suficiente oxígeno en las raíces para asegurar la nitrificación.

Si la remoción de amoníaco observada en Santee se asume que fue realizada por la vía de la nitrificación biológica, es posible calcular la cantidad de oxígeno que estaría disponible para este propósito, dado que se requieren 5 g de oxígeno para nitrificar 1 g de amoníaco. El resultado de estos cálculos se muestra en la Tabla 7.

TABLA 7. OXÍGENO DISPONIBLE POR VEGETACIÓN EMERGENTE DE UN HUMEDAL
EXTRAIDA: (PUBLICACIONES DE HUMEDALES ARTIFICIALES – ESPAÑA – VOL. I, No. 1)

Tipo de planta	Penetración de las raíces (cm)	Oxígeno disponible	
		(g/m ³ *d)†	(g/m ² *d)‡
Scirpus	76	7.5	5.7
Phragmites	60	8.0	4.8
Typha	30	7.0	2.1
Promedio		7.5	

* Profundidad total del lecho de grava 0.76 m

† Oxígeno disponible por unidad de volumen contado en la zona de las raíces.

‡ Oxígeno disponible por unidad de área superficial de lecho de 0.76 m de profundidad.

El oxígeno disponible para la nitrificación por unidad de área superficial va de 2.1 a 5.7 g/m²*d porque la profundidad de penetración de las raíces varía en cada una de las plantas. Este valor de oxígeno está cerca del valor más bajo de las publicaciones que citábamos antes (5-45 g O₂/m²*d). Sin embargo, el oxígeno disponible cuando se expresa en función del volumen en la zona de las raíces, es casi el mismo para las diversas plantas (7.5 g O₂/m³*d en promedio). Esto sugiere que al menos para estas tres especies, el oxígeno disponible para nitrificación será aproximadamente el mismo, así que la nitrificación depende de la profundidad de penetración de las raíces presentes en el lecho del humedal SFS. La ecuación (25) define esta relación:

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922(rz)^{2.6077} \dots\dots\dots(24)$$

Donde:

K_{NH} : Constante de nitrificación a 20 °C, d⁻¹

rz: Porcentaje de la profundidad del lecho del humedal SFS ocupado por la zona de las raíces, como fracción decimal (0a1).

El valor de K_{NH} es 0.4007 con una zona de raíces totalmente desarrollada y 0.01854 si el lecho no tiene vegetación. Estos valores son consistentes con los resultados observados en muchos humedales SFS evaluados por la EPA. Otra confirmación independiente es el trabajo publicado por Bavor et. al. Este modelo toma la misma forma de la ecuación (26) con una constante a 20°C de $0.107d^{-1}$ para un lecho de gravas en el que la zona de las raíces ocupa entre un 50 y un 60% de la profundidad del lecho.

Una vez definida la constante básica K_{NH} es posible determinar la remoción de amoníaco, vía nitrificación, en un humedal SFS usando las ecuaciones (25) y (26)

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-K_T t) \dots\dots\dots(25)$$

$$A_s = \frac{Q \ln(C_0 / C_e)}{K_T y n} \dots\dots\dots(26)$$

Donde:

A_s : Área superficial del humedal, m^2

C_e : Concentración de amoníaco en el efluente, mg/l

C_0 : Concentración de amoníaco en el afluente, mg/l

K_T : Constante dependiente de la temperatura, d^{-1}

n : Porosidad del humedal, (ver Tabla 4)

t : Tiempo de residencia hidráulico, d

y : Profundidad del agua en el humedal, m

Q : Caudal promedio del humedal.

La constante dependiente de la temperatura K_T es como sigue:

$$K_T = 0 \dots\dots\dots d^{-1}, \text{ a } 0^\circ C \text{ (27)}$$

$$K_T = K_{10}(1.15)^{(T-10)} \dots\dots\dots d^{-1}, \text{ de } 1^\circ \text{ a } 10^\circ C \text{ (28)}$$

$$K_T = K_{NH}(1.048)^{(T-20)} \dots\dots\dots d^{-1}, \text{ + } 10^\circ C \text{ (29)}$$

No es aceptable asumir que la zona de raíces ocupará automáticamente la totalidad del lecho, excepto si este es muy poco profundo ($\leq 0.3m$), o si usa grava muy pequeña ($\leq 20 \text{ mm}$).

Profundidades del lecho de 0.6m requieren las medidas especiales para inducir y mantener una penetración total. Si estas medidas no van a ser utilizadas es conservador asumir que la zona de las raíces no ocupará más del 50% de la profundidad del lecho, a menos que las mediciones indiquen otra cosa. Esta recomendación está basada en la experiencia con numerosos sistemas en operación.

La ecuación (26) requerirá normalmente un TRH de entre 6 y 8 días para alcanzar límites exigentes en la remoción de amoníaco en condiciones de verano, con una zona de raíces completamente desarrollada e incluso un largo periodo de bajas temperaturas en invierno.

6.7.2 DESNITRIFICACIÓN

Las ecuaciones (24) a (29) tienen en cuenta solamente la conversión de amoníaco a nitrato, y permiten calcular el área requerida para lograr la conversión deseada. Cuando el proyecto requiere eliminación de nitrógeno, se hace necesario considerar los requerimientos para la desnitrificación y dimensionar el humedal teniéndolos en cuenta. En general, mucha de la producción de nitrato del humedal SFS puede desnitrificarse y ser removida dentro del área prevista para la nitrificación y sin necesidad de proporcionar ninguna fuente de carbono adicional. Puede que los humedales FWS sean más efectivos en la remoción de nitratos que los SFS, ya que tienen una mayor disponibilidad de carbono de los detritus de las

plantas, por lo menos en los primeros años de operación. Aunque los humedales SFS tienen más área superficial para la actividad biológica, es posible que la limitación en la disponibilidad de carbono afecte la desnitrificación y, por tanto, la comparación de los rendimientos. El modelo de diseño recomendado para estimar la remoción de nitratos vía desnitrificación corresponde a las ecuaciones (30) y (31):

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp(-K_T t) \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$A_s = \frac{Q \ln(C_0 / C_e)}{K_T y n} \quad \dots\dots\dots (31)$$

Donde:

- A_s : Área superficial del humedal, m^2
- C_e : Concentración de nitratos en el efluente, mg/l
- C_0 : Concentración de nitratos en el afluente, mg/l
- K_T : Constante dependiente de la temperatura, d^{-1}
- K_T : $0 d^{-1}$ ($0^\circ C$); $1.000(1.15)^{(T-20)}$, d^{-1} (+ de $1^\circ C$)
- n : Porosidad del humedal, (ver Tabla 4)
- t : Tiempo de residencia hidráulico, d
- y : Profundidad del agua en el humedal, m
- Q : Caudal promedio del humedal, m^3/d

La concentración de nitratos en el afluente (C_0) usada en las ecuaciones (30) y (31) es la diferencia entre las concentraciones de entrada y salida determinadas con la ecuación (25). Como la ecuación (25) determina el amoníaco que queda en el sistema después de la nitrificación en el humedal, sería conservador asumir que la diferencia ($C_0 - C_e$) esta disponible como nitrato. La constante de desnitrificación entre $0^\circ C$ y $1^\circ C$ puede determinarse mediante interpolación ($K_T = 0.023$ a $1^\circ C$). Para efectos prácticos la desnitrificación es insignificante a estas temperaturas. Si bien no

sobra recordar que las ecuaciones (30) y (31) solo son aplicables para el nitrato que está presente en el humedal.

Los humedales SFS son en general anóxicos, pero también tienen parte aerobia en la superficie de las raíces y rizomas, por lo que es posible obtener la nitrificación y la desnitrificación en el mismo volumen de reactor. La ecuación (31) nos da el área superficial requerida para la desnitrificación. Esta área de desnitrificación no se adiciona a la calculada para nitrificar y que se determinó con la ecuación (26) y podría ser menor o igual a ésta, dependiendo de las concentraciones de nitratos a la entrada en el agua residual antes del tratamiento así como de la temperatura del agua.

6.7.3 NITRÓGENO TOTAL

Cuando se requiere la desnitrificación, es generalmente porque se tiene un límite de descarga para el nitrógeno total (NT). El nitrógeno total en el efluente del sistema es la suma de los resultados de las ecuaciones (25) y (26). La determinación del área requerida para alcanzar el nivel específico de NT en el efluente es un procedimiento iterativo usando las ecuaciones (25) y (31):

1. Se asume un valor para el amoníaco residual (C_e) y se resuelve la ecuación (25) para obtener el área requerida para nitrificar. Determinando así el TRH para el sistema.
2. Tomar ($C_0 - C_e$) como el nitrato producido por la nitrificación y usar este valor como el del afluente en la ecuación (30). Determinar la concentración de nitratos en el efluente con la ecuación (30).

La concentración de NT en el efluente es la suma de los valores de C_e obtenidos en las ecuaciones (25) y (26). Si no se alcanzó la exigencia de NT se necesita otra iteración de los cálculos.

6.8 MODELO DE DISEÑO PARA REMOCIÓN DE FÓSFORO

La remoción de fósforo no es completamente efectiva ni en los humedales FWS ni en los SFS. Durante el primer año de operación los rendimientos pueden ser excelentes, especialmente en sistemas FWS, debido a la adsorción del recién expuesto suelo del fondo del humedal. La remoción de fósforo a largo plazo, sin embargo, puede ocurrir solo a través de la acumulación de sedimentos a largo plazo. La deposición de estos sedimentos ocurre vía sedimentación particulada y precipitación química principalmente. Estos sedimentos se acumulan como turba dentro de la columna de agua de los humedales FWS y tanto allí como encima del lecho en el caso de los SFS. El fósforo es retenido en esos sedimentos como precipitados de hierro, aluminio o calcio.

Normalmente el fósforo está presente en las aguas residuales en concentraciones de entre 4 y 15 mg/l. Dependiendo del caudal y de la carga hidráulica asociada, es posible remover entre un 30 y un 60% del fósforo presente en el afluente. Si los límites de descarga son exigentes en cuanto a la remoción de fósforo (<1mg/l), se debe considerar una remoción en una laguna anterior o posterior para evitar que el área del humedal sea demasiado grande.

Como la deposición de sedimentos es la principal vía de eliminación del fósforo, la masa removida es función del área superficial del humedal y de la concentración de fósforo en el agua residual. Numerosos investigadores están de acuerdo en que un modelo basado en una forma general de primer orden representa el sistema, sin embargo, no existe consenso acerca de la constante que va asociada al modelo. Un humedal de 16.000 ha. se propuso, basándose en este modelo, para la remoción de fósforo de la totalidad del agua de drenaje de los Everglades en Florida, Estados Unidos.

Basándose en el análisis de los datos de la **North American Data Base**, **Kadlec** ha propuesto una constante de primer orden igual a 10 m/año para estimar la remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales. Los 10 m/año son

equivalentes a un promedio diario de 2.74 cm/d que es lo que se usa en la ecuación (32).

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp\left[\frac{-K_p}{CH}\right] \dots\dots\dots (32)$$

Donde:

C_e : Concentración de fósforo en el efluente, mg/l.

C_0 : Concentración de fósforo en el afluente, mg/l.

K_p : 2.74 cm/d

CH: Carga hidráulica promedio anual, cm/d.

$$A_s = \frac{(b)(Q) \ln(C_0 / C_e)}{K_p} \dots\dots\dots (33)$$

Donde:

A_s : Área superficial del humedal, m².

b: factor de conversión. 100 cm/m

Q: Caudal promedio del humedal.

Aunque el modelo fue desarrollado en un principio a partir de datos de humedales FWS, podría ser válido para predecir el promedio de fósforo removido por cualquiera de los dos sistemas, FWS o SFS ya que depende del área superficial y no de las reacciones biológicas ocurridas en el área superficial específica del medio o detritus de plantas dentro de la zona del humedal.

En general se puede decir que se requiere un área realmente grande para alcanzar los niveles de fósforo en el efluente final. En muchos casos no es una solución efectiva desde el punto de vista económico considerar la remoción de fósforo con estas tecnologías; en estos casos el humedal debe diseñarse para la eliminación de nitrógeno y el diseño incorporara un tratamiento alternativo para la eliminación de fósforo.

6.9 DIMENSIONAMIENTO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL TIPO SISTEMA SUBSUPERFICIAL (S.F.S.)

El diseño del sistema artificial propuesto será utilizado para el tratamiento y reciclaje del agua en circuito cerrado, donde las características físicas, químicas y biológicas difieren mucho de las aguas de origen doméstico e industrial.

Los principales parámetros incluye el tiempo de retención hidráulica, la profundidad y geometría del estanque (ancho – longitud). En la tabla 3 se indica los intervalos de estos parámetros recomendados para el proyecto.

6.9.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El diseño de celdas de fluido para el tratamiento de aguas del Parque de la Exposición

Superficie	:	138 m ²
Longitud	:	6 m
Anchura	:	23 m
Profundidad del lecho	:	1 m
Profundidad del lecho de grava	:	0.75 m
Profundidad vegetación	:	0.6 m
Plantación	:	Aprox. 12 plantas de caña brava (<i>Phragmitas Australes</i>) por m ²
Pendiente hidrológica	:	5% (del afluente al efluente)
Material del filtro	:	Grava lavada de 3-5mm de diámetro
Material de sellado del lecho	:	Lámina plástica de polietileno de alta densidad (PEHD).

6.9.2 DATOS TÉCNICOS DEL SISTEMA

Tiempo de retención hidráulica (mínimo)	:	2 hs
Diámetro efectivo de las partículas de grava:		> 0,7 mm
Flujo de agua	:	345 m ³ /d

6.9.3 LISTA DE MATERIALES

Grava	:	8 - 16 mm de diámetro, área de carga y descarga
Grava	:	4 - 8 mm de diámetro, filtro del lecho
Lámina plástica	:	Polietileno de 1 - 2 mm ó polivinilclorhídrico, resistente a las raíces y a los rayos ultravioletas.
Tubos de carga	:	De 4" de diámetro, perforados y no perforados
Tubos de descarga	:	Tubos de drenaje de 4", perforados y no perforados
Plantas	:	Phragmites Australis
Canal de carga	:	En forma de u, de 6" (estructura de carga)
Canal de descarga	:	En forma de U, de 6" (estructura de descarga)

6.9.4 DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SISTEMA BAJO DE SUPERFICIE (S.F.S).

Debemos notar que las características físicas, químicas y biológicas de las aguas contaminadas en las lagunas artificiales defiere mucho en composición de las aguas residuales de origen doméstico e industrial, como tal se diseño el sistema artificial en función de la permeabilidad de la grava para ser utilizada en el tratamiento de aguas en la Laguna s Artificiales en el Parque de la Exposición.

- **DATOS :**

$$\text{Caudal (Q)} = 345 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Pendiente (m)} = 0.05\%$$

Medio = Arena gravosa

$$\text{Cond. Hidráulica (Ks)} = 5000 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

= Roca gruesa

$$\text{Cond. Hidráulica (Ks)} = 90,000 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$$

Porosidad (n) = 0.35

Permeabilidad = 432 m/d

Vegetación = Phragmites Australis

Profundidad = 0.6 m

1. Calculo de la gradiente hidráulica, la más pequeña posible. Ec. (8).

$$\text{Donde : } V = K_s \cdot S \rightarrow S = \frac{432 \text{ m/d}}{90,000 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}} = 0.005$$

2. Calculo área transversal. Ec. (9)

$$A_c = \frac{Q}{K_s \cdot S} = \frac{345 \text{ m}^3/\text{d}}{5000 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d} \times 0.005} = 13.8 \text{ m}^2$$

3. Cálculo de ancho . De la Ec. (9) sustituyendo y reorganizado los términos es posible desarrollar una ecuación que determine el ancho mínimo de una celda del Humedal (S.F.S)

$$W = \frac{Ac}{Y} = \frac{13.8 \text{ m}^2}{0.6\text{m}} = 23 \text{ m}$$

4. Cálculo de la velocidad del agua afluyente – efluente. Ec. (8.1)

$$V = \frac{Q}{W.Y} = \frac{345 \text{ m}^3/\text{d}}{23 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}} = 25 \text{ m/d}$$

5. Cálculo de longitud sustituyendo y reorganizando la Ec. (9) en función de la gradiente hidráulica .

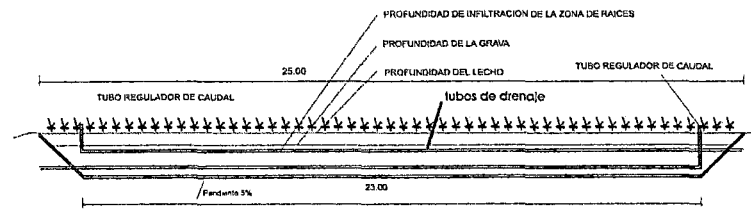
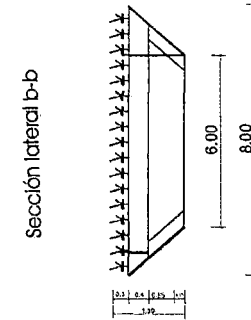
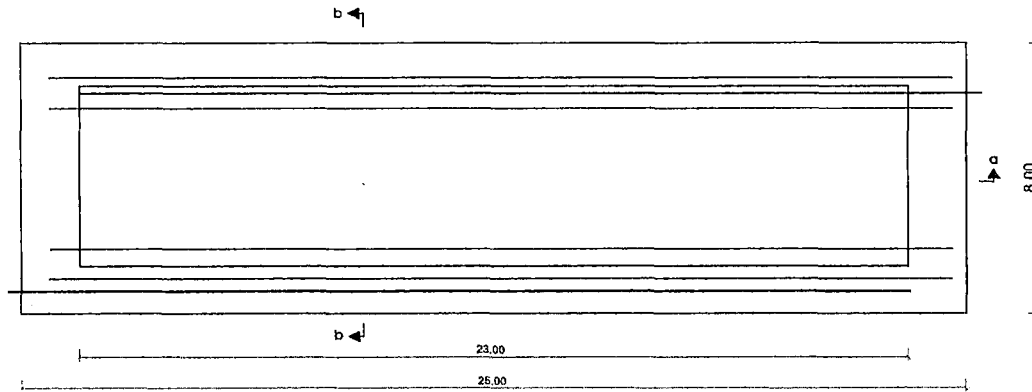
$$L = \frac{m.Y}{S} = \frac{0.05 \times 0.6 \text{ m}}{0.005} = 6 \text{ m}$$

6. Cálculo del tiempo de retención hidráulica. Ec. (2)

$$T = \frac{W.L.Y.n}{Q} = \frac{23 \text{ m} \times 6\text{m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.35}{345 \text{ m}^3/\text{d}} = 0.084\text{d} \cong 2\text{Hr}$$

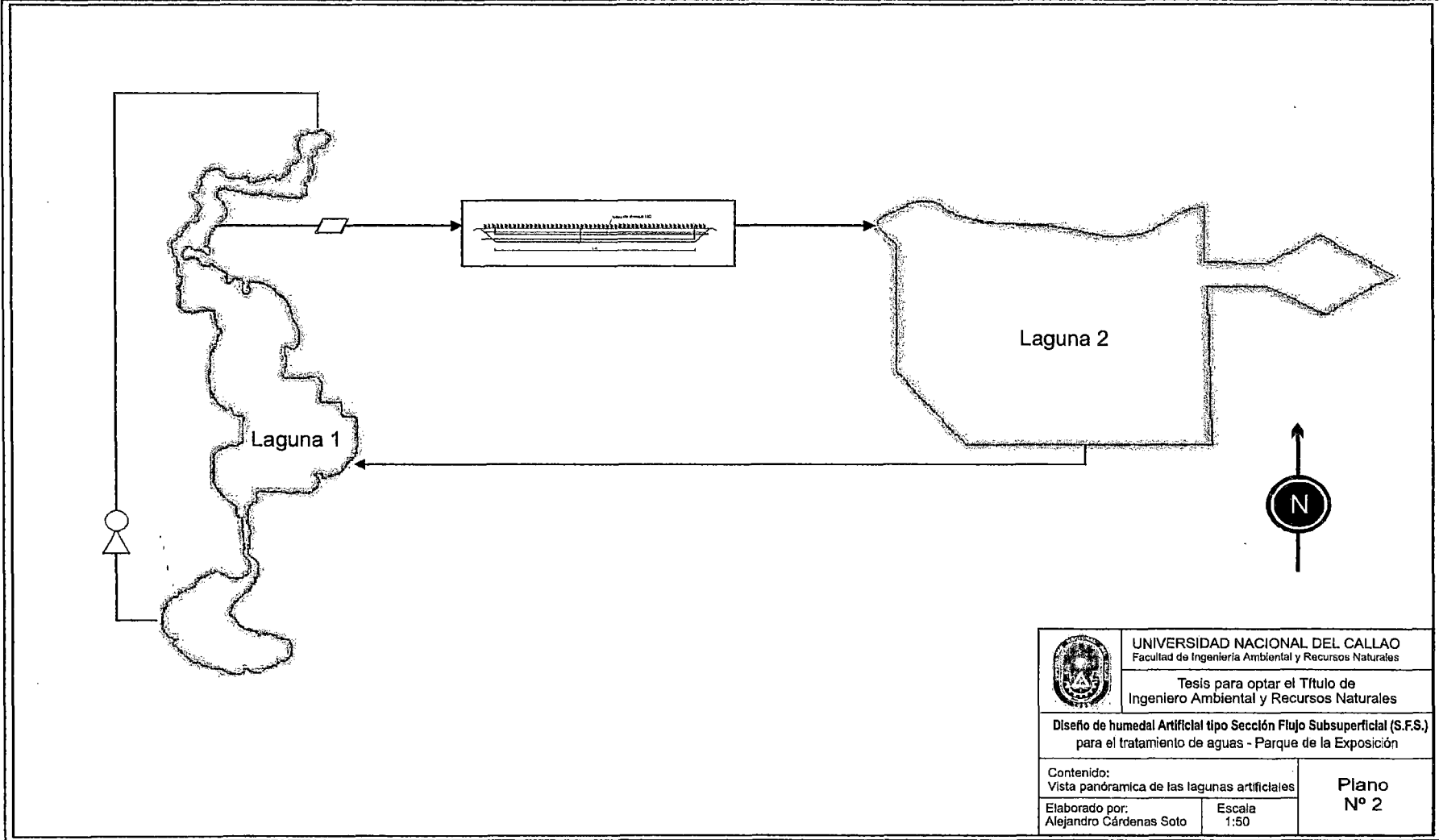
7. Cálculo del área necesaria . Utilizando la Ec. (4)

$$As = L.W = 23 \text{ m} \times 6 = 138\text{m}^2$$



Sección longitudinal a-a

 UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales		Tesis para optar el Título de Ingeniero Ambiental y Recursos Naturales	
Contenido: Vista de la sección longitudinal y lateral		Plano N° 1	
Elaborado por: Alejandro Cárdenas Soto	Escala 1:50		



6.9.5 COSTOS DE INSTALACION Y OPERACION

6.9.5.1 Costos de Instalación

1. Área total usado para la instalación del humedal

$$\text{Área total} = 185 \text{ m}^2$$

2. Limpieza y nivelación del terreno = 185 m^2

Costo de limpieza y nivelación

$$185 \text{ m}^2 \times \text{S}/.1.05 / \text{m}^2 = \text{S}/.194.25 \cong \$56.30$$

3. Levantamiento de la celda

Costo de levantamiento

$$300 \text{ m}^3 \times \text{S}/.3.12 / \text{m}^3 = \text{S}/.936.00 \cong \$271.3$$

4. Vegetación aproximada 12 plantas de caña por m^2

La vegetación será recolectada de la Cuenca del Río Lurín, emplearemos

2 peones x dos días debidamente capacitados sobre la forma de extraer sin dañar sus raíces y rizomas.

Costo de recolección de la vegetación

$$2 [\text{S}/.20,00 \text{ día hombre} \times 2 \text{ días}] = \text{S}/.80.00 \cong 23.180$$

5. Medio de Transporte

Costo Alquiler Camioneta PIK UP

$$\text{S}/.90.00 \text{ día} \cong \$26.08$$

6. Sembrado de 138 m^2

Para el sembrado emplearemos 2 peones por 2 días con las indicaciones

inertes

Costo sembrado de la vegetación

$$2 [S/.20,00 \text{ día hombre} \times 2 \text{ días}] = S/.80.00 \cong 23.180$$

7. Canal de carga – descarga (entrada – salida)

Costo de accesorios PVC

$$\text{Tees de 5 pulg. Diámetro} = 10 \times S/.8.20 = S/.82.00 \cong \$23.76$$

$$\text{Codos de 5 pulg. Diámetro} = 5 \times S/.6.50 = 32.5 \cong \$9.42$$

8. Instalación de estructura de entrada - salida

$$\text{Trabajos en concreto armado} = S/.210.00 \cong \$60.00$$

$$\text{Empastado} = 2(2\text{m}^2) \times 21.38/\text{m}^2 = S/.85.52 \cong \$ = 24.78$$

Costo total de estructura de salida – entrada

$$S/. 295.52 \cong \$ = 84.78$$

9. Piedra chancada (4 – 8) mm $110 \text{ m}^3 \times 28.46 = S/.3130.875 \quad \$ = 907.5$

Piedra chancada (8 – 16) mm $15 \text{ m}^3 \times 43.64 = S/.654.63 \quad \$ = 189.75$

10. Una bomba hidráulica 1HP

$$\text{Costo } S/.759.00, \cong \$ = 200.00$$

11. Precio de losa para la instalación de la bomba

$$\text{Concreto } 210\text{kg}/\text{cm}^3 \quad S/.250.70/\text{m}^3 \cong \$ 72.66$$

12. Válvula para regular el caudal (doble cierre)

$$\text{De 4 pulgadas de diámetro } S/.70.00 \cong \$ 20.28$$

13. Material Impermeable

$$350 \text{ m}^2 \times S/.12.42 = S/.4,347 \cong \$ 260.00$$

14. Nivelación manual interior y aprisionado

$$138 \text{ m}^2 \times S/.1.18/\text{m}^2 = S/.162.84 \cong \$ 47.2$$

15. Tuberías PVC

De 4 pulg. de diámetro = $60 \text{ m} \times \text{S}/.28.46 = \text{S}/1707.75 \cong \$ 495.00$

Costo de instalación:

$60 \text{ mL} \times 2.25/\text{mL} = \text{S}/.135.00 \cong \$ 39.130$

Costo total:

\$ 534.13

16. Instalación eléctrica

5m de cable eléctrico (3 x 16 AWG)

$5 \times \text{S}/.1.70 = \text{S}/.8.5 = \$ 2.46$

5 m tubería plástica (1/2) de PVC rígida para instalación eléctrica

$5 \text{ m} \times 1.80 = \text{S}/.9.00 \cong \$ 2.608$

Una caja eléctrica, interruptor de cuchilla, tomacorriente, enchufe

$\text{S}/.50.00 = \$ 14.49$

Precio de instalación de la bomba $\text{S}/.150.00 \cong \$ 43.47$

Costo total de la instalación eléctrica

Costo total = \$ 63.02

17. Ingeniería asesoramiento y contingencia

\$ 1,128.00

6.9.5.2 COSTO DE OPERACIÓN

- Un ingeniero para supervisar el funcionamiento del sistema:

Suelo mensual \$ 2,000.00

Se inspecciona 3 veces a la semana (12 días al mes)

Sueldo mensual \$ 800 al año será \$ 9,600

- Un peón para las labores de inspección y mantenimiento

$\text{S}/. 20.00 \text{ día hombre} \times 365 \text{ días/año} = \text{S}/.7,300 \cong \$ 2115.94$

- Costo operación de la bomba 1HP CAP

Consumo = Potencia del equipo en Kw - hr x horas de uso por día x
número de días de uso mes x tarifa vigente

$$C = 1 \text{ HP (us) - hr} \times \frac{0.7355 \text{ Kw - hr}}{1 \text{ HP (us) - hr}} \times 24 \frac{\text{hr}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ día}}{\text{año}} \times \frac{0.386}{\text{Kw - hr}}$$

$$C = \text{S/. } 2,486.99 \cong \$ 720.86$$

$$\text{Costo total de operación} = \$ 12,436.8$$

**TABLA 8. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN PARA 138 m² DE UN HUMEDAL
TIPO (S.F.S.)**

Artículos	Cantidad	Costo Unit. S/.	Precio \$
Celda (dique)	300 m ³	3.12/m ³	271.3
Limpieza nivelación	185 m ³	1.05/m ³	56.30
Vegetación 12 x m ²	138 m ²	20.00 día	23.18
Transporte	1 día	90.00 día	26.08
Sembrado	138 m ²	20.00 día	23.18
Entrada-salida	2		84.78
Grava 4 – 8	110 m ³	28.46/m ³	907.50
Grava 8 – 16	15 m ²	43.64/m ³	189.75
1 bomba 1 HP	1		200.00
Losa de la bomba	1	250.70/m ³	72.66
Válvula de doble cierre	1	20.28	20.28
Lamina plástica	350 m ²	12.42	1,260.00
Apisonado	138 m ²	1.18/m ²	47.20
Tubería	60 m	28.46	495.00
Instalación tubería	60 m	2.25/mL	39.13
Inst. Eléctrica total			43.47
		Costo de Construcción	\$ 3762.27
		Ingeniería Supervisión	\$12,436.8
		Costo Total	\$16,199.07

CAPITULO VII

RESULTADOS

Después del diagnóstico preliminar de las lagunas artificiales entre sus componentes y infraestructura de diseño de las lagunas se procedió a la toma de muestras para el análisis microbiológico, que finalmente justifica el tratamiento de aguas a fin de garantizar la salubridad pública, por consiguiente se planteo el diseño de un área húmeda artificial, cuya metodología incluye la remediación de aguas por una zona de raíces de plantas acuáticas y microorganismos habilitadas en el humedal. En efecto la metodología seleccionada permite validar el estudio y generar un documento de consulta para investigaciones futuras respecto al tema.

7.1 Infraestructura de las Lagunas Artificiales

Se encontró que las lagunas artificiales carece de un sistema de recirculación y tratamiento de aguas, presenta deficiente instalación de redes para la evacuación del agua residual e eliminación de lodos. Se revela según el tiempo que transcurre el agua varía las características físicas en el contenido total de sólidos (disueltos y en suspensión) en lo que le confiere a las aguas sus propiedades físicas es de color gris verdoso, olor desagradable y en estado de descomposición.

Las características químicas se debe a la materia orgánica (heces de peces), inorgánicas (objetos metálicos) y gases propios de la biodegradación orgánica.

Los resultados preliminares respecto a la calidad de agua en las lagunas artificiales sobrepasan los niveles estándares de calidad de agua para preservación de fauna acuática y uso recreativo (Ver Cuadro de Resultados 1, 2, 3).

EXAMEN REALIZADO : BACTERIOLÓGICO**1° Muestra : Agua de preservación de Fauna Acuática**

Volumen : 250 ml.

Fecha y hora de muestreo : 10/07/02 10:00 a.m.

Fecha y hora de análisis : 10/07/02 14:00 p.m.

Inspección de Campo

- Color de agua verdoso
- Presencia de plumas en las orillas de la laguna
- No existe recirculación del agua

Análisis Microbiológico y demanda bioquímica de oxígeno

- Cloro residual : Cero

Determinaciones	Unidades	Resultado	Clase VI (*)
Numeración de coliformes totales	NMP/100ml	25000	20000
Numeración de coliformes termotolerantes (fecales)	NMP/100ml	6000	4000
DBO ₅	mg/l	50	20

(*) Ley General de Aguas, Clase VI. Aguas de zona de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial.

Cuadro 1 : Primer resultado del Análisis Microbiológico

- 2° **Muestra** : **Agua de preservación de Fauna Acuática**
- Volumen : 250 ml.
- Fecha y hora de muestreo : 12/07/02 10:00 a.m.
- Fecha y hora de análisis : 12/07/02 14:00 p.m.

Análisis Microbiológico y demanda bioquímica de oxígeno

- Cloro residual : Cero

Determinaciones	Unidades	Resultado	Clase VI (*)
Numeración de coliformes totales	NMP/100ml	30000	20000
Numeración de coliformes termotolerantes (fecales)	NMP/100ml	8000	4000
DBO ₅	mg/l	60	20

Cuadro 2 : Segundo resultado del Análisis Microbiológico

- 3° **Muestra** : **Agua de preservación de Fauna Acuática**
- Volumen : 250 ml.
- Fecha y hora de muestreo : 19/07/02 10:00 a.m.
- Fecha y hora de análisis : 19/07/02 14:00 p.m.

Análisis Microbiológico y demanda bioquímica de oxígeno

- Cloro residual : Cero

Determinaciones	Unidades	Resultado	Clase VI (*)
Numeración de coliformes totales	NMP/100ml	60000	20000
Numeración de coliformes termotolerantes (fecales)	NMP/100ml	10000	4000
DBO ₅	mg/l	60	20

Cuadro 3 : Tercer resultado del Análisis Microbiológico

7.1.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La muestra de agua analizada desde un punto de vista microbiológico sobrepasa los estándares de calidad del agua, de acuerdo a la Clase VI de la Ley General de Aguas respecto a Coniformes Totales y Fecales.

7.1.2 CALIFICACIÓN DE AGUA EN LAGUNAS ARTIFICIALES

El agua no es recomendable para uso de preservación de fauna acuática.

7.2 RECURSO HÍDRICO Y MANTENIMIENTO

Las lagunas artificiales requiere gran demanda de agua potable por periodos de recambio y evapotranspiración, que ocasiona gastos en valor económico y equipos.

7.3 DETERIORO DE LA INFRAESTRUCTURA PERIMÉTRICA

El nivel perimétrico de las lagunas experimentan una calidad ambiental desagradable desde el punto de vista paisajística y visual, debido al escaso conocimiento del cuidado ambiental.

7.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Con respecto a la investigación realizada las lagunas artificiales del Parque de la Exposición, requiere el tratamiento de aguas, a fin de garantizar la salubridad y mejoramiento ambiental para el público visitante.

7.4.1 DISEÑO DE UN ÁREA HÚMEDA ARTIFICIAL

Se diseñó el sistema artificial tipo flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas en las lagunas artificiales del Parque de La Exposición. (Ver plano N° 1).

7.5 VIABILIDAD DEL SISTEMA ARTIFICIAL

El diseño y implementación del sistema biológico cuya remediación de aguas residuales en humedales artificiales puede generar la validación de los parámetros analizados en igualdad de condiciones para con otros países y la aceptación de esta tecnología.

7.6 BENEFICIOS AMBIENTALES

La protección de la salud pública es el propósito fundamental del tratamiento de aguas y le sigue en importancia la protección del medio ambiente, por consiguiente la aplicación de esta metodología resulta:

- Reducción de los índices de contaminación
- Reducción del volumen de aguas residuales
- Incremento de áreas verdes en el parque
- Aumento de zonas de oxigenación para el parque

CAPITULO VIII

DISCUSIÓN

El presente trabajo de investigación es la recopilación reciente disponible de la literatura en particular relacionada a la utilización de humedales construidos, para ser utilizada en la depuración de aguas en las lagunas artificiales del Parque de La Exposición.

En nuestro país las experiencias en cuanto a los humedales construidos son escasos, siendo una iniciativa este trabajo para futuras investigaciones.

De la información recogida sobre humedales construidos puede referirse y comparar lo siguiente con respecto al diseño propuesto:

- El tiempo de retención hidráulica calculada para el presente estudio es de (aprox. 2 horas) para el tratamiento y remoción de DBO_5 , SST según las características de la composición de las aguas en las lagunas artificiales del Parque de La Exposición.
Comparados con los teóricos encontrados en la literatura utilizada indica mayor eficiencia de en la remoción de DBO_5 , SST (aprox. 7.5 días) para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico e industrial.
- La descomposición de los ditritus de las plantas y otros materiales orgánicos naturales en los humedales construidos resulta en un D.B.O_5 de salida de (2-7) mg/l independiente del periodo de retención hidráulica (Reed y Brow 1995).
- La mayor contribución de la vegetación en el humedal es el servicio que presta la estructura de las raíces y rizomas como substrato para actividad microbiana.

- El mayor rendimiento de la zona de la raíz será cuando la altura del lecho no exceda al potencial de desarrollo de la especie de la planta seleccionada, en este caso.
- Los modelos matemáticos analizados requieren necesariamente ser comprobados con los datos de campo, al momento de emprender la construcción del sistema artificial.
- Los modelos matemáticos permite un diseño preliminar aproximado del área de trabajo.
- El Humedal artificial diseñada reducirá a los niveles estándar de calidad de agua para uso recreativo respecto a coliformes totales y fecales, independientes de la retención hidráulica de 2 h.
- La concentración de coliformes totales y fecales analizados días antes del periodo de recambio de agua muestra de 8×10^4 NMP/100ml. Comparado con la concentración de coliformes totales es aproximadamente de 2×10^7 NMP/100 ml en aguas residuales de origen doméstico. (Castro de Esparza, M.L.; Saénz Forero, R. 1990) Es decir 8×10^4 NMP/100 ml \lllll 2×10^7 NMP/100ml (ver cuadros de resultados 1, 2, 3).
- Las características físicas, químicas y biológicas del agua residual en las lagunas artificiales defieren mucho de las características físicas, químicas y biológicas del agua residual de origen urbano. Sin embargo los contaminantes presentes las hacen adecuadas para el uso al que se destina por lo tanto reciben el nombre de aguas contaminadas o aguas residuales.

CAPITULO IX

CONCLUSIONES

El sistema artificial propuesto es una técnica, económicamente factible para el tratamiento de aguas en las lagunas artificiales del Parque de la Exposición.

9.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

VENTAJAS:

- Se reducirá la cantidad de lodos en las lagunas.
- Se reducirá el consumo de agua por periodos de recambio y limpieza.
- Propone alcanzar la calidad de agua para uso recreativo y fauna acuática.
- Se evitará la descomposición del agua por lo tanto se disminuirá la proliferación de microorganismos.
- No requiere persona especialista para el mantenimiento y manejo del sistema artificial.

DESVENTAJAS:

- Criterios de diseño y funcionamiento no suficientemente conocido para sistemas en circuito cerrado.
- Desconocimiento de procesos biológicos e hidrológicos que intervienen.
- Necesidad de dos o tres estaciones de crecimiento de las plantas para llegar al máximo rendimiento.

9.2 CONCLUSIONES FINALES

La conclusión principal del trabajo es que los humedales artificiales son una tecnología viable para la depuración de aguas residuales, y puede llegar a tener un gran futuro, donde las condiciones económicas de estos proyectos (necesidades de terreno, relativamente menores los costos de instalación, operación y mantenimiento), pueden ser determinantes a la hora de emprender o no la depuración de las aguas residuales, si a este punto adicionamos las condiciones climáticas que favorecerían los rendimientos, tendríamos una interesante posibilidad de solución.

Desafortunadamente este tema ha sido estudiado principalmente en países con climas bastante fríos, por lo cual es necesario realizar trabajos de investigación tendientes a adecuar los modelos de diseño a las condiciones locales y analizar sus comportamientos con los otros factores involucrados que junto con la temperatura pueden llegar a variar las eficiencias, como pueden ser las plantas autóctonas, los tipos de medios granulares, etc.

CAPITULO X

RECOMENDACIONES

1. El diseño de sistema de flujo subsuperficial (S.F.S) requiere menor área comparados con sistemas de flujo libre, en efecto es oportuno su aplicación en áreas reducidas.
2. La vegetación es un componente crítico de los humedales artificiales, la densidad poblacional de las plantas saludables determinará el rendimiento exitoso, por lo que hay que evitar las plagas e insectos que ocasionan estos problemas (reed et al, 1995).
3. Las especies de plantas deberán ser propias de la región para mantener la biodiversidad y que no haya necesidad de aclimatación a la carga orgánica de los estanques artificiales, la capacidad de transferencia de oxígeno de las plantas pueden ser sobrepasadas por cargas elevadas, los efectos de esta traerían consigo la declinación, muerte de las plantas.
4. La instalación del sistema propuesto posibilitará la replica del modelo y un estudio integral de ingeniería con las condiciones geográficas y climáticas de nuestro medio.
5. Cambio de actitud en el manejo de recursos hidráulicos utilizando tecnologías naturales.

CAPITULO XI

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍAS

- Asociación GHIIS JAA, (1989); Revista Panorama Ambiental – Perú
- Archivo de Boletín de Humedales y Zonas Costeras Volumen 1.
- BENEFIELD, L. D. And C. W. RANDALL (1980), Biological Process Design For Wastewater Treatment, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.
- BERGLUND, B. BERGLUND, (1986) “Loudness Of Power Line Noise”, U. Nacional Swedish Environment Protection Berrad, Solna Sweden.
- BUCHBERGER, S.G. And G. B. Shâw (1993) An Approâch Toward Rationâl Design of Constructed Wetlands For Wastewater Treatment, Techinal Report; Submitted To Dr. Willian J. Mitsch, editor of the Ecological Engineering, Department of civil and Environmental Enginneering, University of Cincinnati OH, 42221, 0071.
- Cámara Peruana de la Construcción (1996), Anuariun de la Construcción 96, Manual del Empresario Constructor Publicado por la Cámara Peruana de la Construcción.
- Cámara Peruana de la Construcción (1996), Construcción e Industria, Revista publicada por la Cámara Peruana de la Construcción año XXXIV, N° 112 del 24 de Agosto al 23 de Setiembre de 1996.
- CANO A.A.J, Collado L. R, La lenteja de agua como sistema blando de depuración de aguas residuales de bajo coste en Tecnologías del agua No. 174, Marzo de 1998, Pg 18-25.

- CASTRO DE ESPARZA, M.L; SÁENZ FORERO, R; (1990). evaluación de riesgos para la salud por el uso de aguas residuales en agricultura, Volumen I : Aspectos Bacteriológicos. CEPIS/OPS, LIMA, PERU.
- ECKENFELDER, W; Wesley Jr. (1970), Water quality Engineering for practicing, Engineers, Barnes & Noble, New York.
- ECKENFELDER, W; Wesley Jr. (1989), Industrial Water Pollution Control, Second edition Mc. Graw – Hill , New York.
- ESTEVEZ S.F., (1997), Diseño y Explotación de Sistemas de Depuración de aguas residuales en pequeños núcleos y comunidades, Asociación Nacional de Químicos Españoles, Agrupación Territorial de Castilla la Mancha, Sección Tecnicas de Redin Ambiente.
- FAULKNER S.P. And J.R. Curtis (1988) Physical and Chemical Characteristics Of Freshwater Wetland Soils Chapter 4 in, Constructed Wetlands For Wastewater Treatment, ed by D.A. Hammer, Lewis Publishers Chelsea MI.
- GARCIA J, RUIZ A, JUNQUERAS X, (1997). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos en tecnología del agua No. 165, Pág. 58 – 65.
- GEARHART. R. A(1993) Construction, Constructions Monitoring And Anallary Benefits, Enveronmental Enginneering Department, Humbolt State University, ARCITA, C.A.
- HAMMER D.A, And RK Bastian (1989). Wellands Ecosystems Natural Water Purifiers. Chapter 2 in, Constructed Wetland for Wastewater Treatment, ed. By D.A. Hammer, Liwis publishers, Chelsea MI
- HARBEL R, PERFLER, R., Laber J. Cooper (1996) Pollution control, en Water Science and Technology . Vol 35 No. 5.

- HERSKOWITZ, J., S (1986), Town Of Lestowel Artificial Marsh Proyect Final Report, Proyect N° 128 RN, Ontario Ministry Of The Environment, Toronto Canada.
- HERNÁNDEZ NÚÑEZ, Aurelio (1994): Depuración de aguas residuales 3ª Edición 1994
- HITSCH W.J. and J.G. GOSSOLINK (1993) Wetlands Second Edition Van nostrand Reinhold Company New York.
- KADLEC R. H, KMGKT R.L. (1989) Treatment Wetlands, CRC Press.
- KADLEC R. H, KMGKT R.L. (1989) Hydrologil Factor in Wetlands Water Treatment, Chapter 3 in, Constructed Wetlands For Wastewater Treatment, ed. By D.A. Hammer, Lewis publishers Chelsea MI.
- KNIGHT, Robert L. (1994): Treatment Wetlands Database Now Available. Water Environment & Technology Vol. 6, 2: 31-33
- MARTINEZ M., (1989) Depuración de agües con plantas emergentes en hojas divulgadoras, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- METCALF & Hedí (1995). Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización 3ª Ed, MC GRAW- Hill,. 1995.
- PALOMINO J. (1995), Modelaje de Filtros Ecologías Tipo Humedales Artificiales para tratamiento de A. R., Universidad de Puerto Rico Recinto Universitario de Mayaguez Puerto Rico On 681 - 5000
- PETRONI Ricardo Nicolás. Desarrollo y Aplicaciones de un Modelo Dimensional de Calidad de agua.
- Reed S.C. (1990) Natural Systems for Watewates Treatment Manual of Practice F.D. -16, Water pollution control federation (W.E.F) Alexandria y VA.

- Reed S.C. Crites. R.W. Crites Middlebrooks, E.J. (1995), Natural Systems for waste Management and Treatment, 2° Edition. McGraw Hill New York
- Reed S.C. And D. Brown, (1999), Subsurface Flow Wetlands-A Performance Evaluation, Water environment research, Volumen 67, March/abril 1995
- Seoanez C.M (1995), Aguas residuales urbanas: Tratamiento Natural de bajo costo y aprovechamiento, Mundi Prensa 1995.
- Therot, Russel F. (1999) Wetlands: A challenge for researches, Water Environment & Technology Vol 6,2:4 Reed, S.C. and D. Brown (1995) Subsurface flow Wetlands a performance evaluation, water environment research Volumen 67. March/April 1995
- U.S Environmental Protection Agency (1993) Process Design Manual for Nitrogen Control, EPA/625/R-931010, Center For Environmental Research Information Cincinnati, OH.
- U.S Environmental Protection Agency (1998) Design Manual Constructed Wetlands and aquatic plants Systems For Municipal Wastewater Treatment EPA. 625/1-88/022, US EPA CERL Cincinnati, OH.

ANEXO

- Ejemplo de Diseño de Humedales Artificiales Sistema Bajo de la Superficie .
- Apéndice

Ejemplo de Cálculo de Diseño de un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial, para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico e industrial.

A continuación se presenta el cálculo, tendiente a determinar las características de un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales.

Datos de Partida :

- DBO entrada : 130 mg/1
- DBO salida : 20 mg/1
- SST entrada : 130 mg/1
- Caudal Q : 1.000 m³/d
- Población : 2,800 hab.
- Medio : grava media de 25mm. $n = 0.38$, $K_s = 25000\text{m}^3/\text{m}^2*\text{d}$.
- Vegetación : Carrizos
- Profundidad del Humedal SFS : 0.6m
- Temperatura critica en invierno : -5° C
- Temperatura del agua a la entrada : 10° C

Asumimos una temperatura del agua de diseño en el humedal SFS de 9.5° C.
Usamos las ecuaciones (28)

$$K_t = 1.104(1.06)^{(9-20)} = 0.5816\text{d}^{-3}$$

Determinación del área superficial para el humedal SFS bajo condiciones de invierno usando la ecuación (31) .

$$A_s = \frac{(1000)(1n130 - 1n20)}{0.5816(0.6)(0.38)} = 14116\text{m}^2$$

$$THR = \frac{(1411)(0.6)(0.38)}{1000} = -3.2d$$

Cálculo de la temperatura promedio del agua, usando las ecuaciones (12) a (17). Asumimos una capa de residuo de vegetación de 15cm, y una capa de grava más gruesa (80mm) que cubre el humedal. Los otros datos se obtienen de la Tabla 5.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.15}{0.05}\right) + \left(\frac{0.08}{1.5}\right) + \left(\frac{0.60}{2}\right)} = 0.30$$

$$T_c = \frac{(0.3)(86400)(3.1)}{(4215)(1000)(0.6)(0.38)} = (10 - (-59)) = 1.3^\circ C$$

$$T_e = 10 - 1.3 = 8.7^\circ C$$

$$T_w = \frac{10 + 8.7}{2} = 9.4^\circ C$$

Así que la temperatura de 9° C asumida es correcta y el dimensionamiento del humedal también.

Dividimos el área en tres celdas iguales de 4705m² cada una. Ahora determinamos la relación ancho : largo usando la ecuación (10) en la que el caudal será también 1/3 del total. Tomamos un valor de m de 0.05.

$$W = \frac{1}{0.6} \left[\frac{(333.333)(4705)}{(0.05)(8333)} \right]^{0.5} = 102.3m$$

Tomamos 120 m

$$L = \frac{4705}{120} = 39.2m$$

$$L : W = 3.1:1$$

A continuación calcularemos la remoción de sólidos suspendidos totales, pero como se dijo con anterioridad es solamente una estimación, dado que éste no es un factor limitante en el diseño y el método de cálculo solo permite esta aproximación.

$$\text{SFS} : CH - (Q/A3)(100) = (1000/14116)(100) = 7.1 \text{ cm/d}$$

$$\text{SFS} : C_e = (130)(0.1058 + 0.0011(7.1)) = 14.8 \text{ mg/l}$$

Como dije antes esta es una mera estimación, pero nos sirve para comprobar los buenos rendimientos del sistema en este aspecto (cercaos al 90%).

Para el humedal SFS determinamos la constante K_{NH} para 50 y para 100% de la zona de raíces usando la ecuación (24)

$$K_{NH}(50\%rz) = 0.01854 + 0.3922(0.5)^{2.6077} = 0.0828d^{-1}$$

$$K_{NH}(100\%rz) = 0.01854 + 0.3922(1.0)^{2.6077} = 0.4107d^{-1}$$

Determinación del área requerida para la nitrificación en el humedal SFS usando la ecuación (26) .

$$A_s = \frac{1000ln(25/3)}{0.0829(0.6)(0.38)} = 12197m^2$$

(rz = 50%) :

$$\text{TRH : } t = (112197)(0.6)(0.38)/(1000) = 25.6 \text{ d}$$

$$A_s = \frac{10001n(25/3)}{0.4107(0.6)(0.38)} = 22641m^2$$

(rz = 100%) :

$$\text{TRH : } t = (22641)(0.6)(0.38)/(1000) = 5.2 \text{ d}$$

Determinación de la concentración de nitratos en el afluente usando la ecuación (30)

$$(rz = 50\%) : C_e = (22) \exp [-(1.000)(25.6)] < 0.01 \text{ mg/l}$$

$$(rz = 100\%) : C_e = (22) \exp [-(1.000)(5.2)] < 0.13 \text{ mg/l}$$

Determinación del nitrógeno total en el efluente del humedal.

$$(rz = 50\%) : \text{NT} = 3 + 0.01 - 3.01 \text{ mg/l} \approx 3 \text{ mg/l}$$

$$(rz = 100\%) : \text{NT} = 3 + 0.13 - 3.13 \text{ mg/l} > 3 \text{ mg/l} \text{ Muy alto}$$

El área y el TRH son muy pequeños en el caso del 100% de penetración de las raíces para una desnitrificación suficiente. Se necesita otra iteración , y asumiremos una concentración de amoníaco de 2 mg/l

$$A_s = \frac{10001n(25/2)}{0.4107(0.6)(0.38)} = 26970m^2$$

$$\text{TRH : } t = (26970)(0.6)(0.38)/(1000) = 6.1 \text{ d}$$

$$C_e = (23) \exp [-1(1000)(6.1)] < 0.05 \text{ mg/l}$$

$$\text{NT} - 2 + 0.05 = 2.05 \text{ mg/l} \approx 3 \text{ mg/l}$$

Determinación de la carga hidráulica para eliminación de fósforo.

$$\text{FWS : CH} = (100) (1000 \text{ m}^3/\text{d}) / 79447 \text{ m}^2 = 1.26 \text{ cm/d}$$

$$\text{SFS : CH} = (100)(1000 \text{ m}^3/\text{d})/26970 \text{ m}^2 = 3.71 \text{ cm/d}$$

Determinación de la concentración de fósforo en el efluente usando la ecuación (32)

$$\text{SFS : } C_e = (12) \exp\left[\frac{-2.74}{3.71}\right] = 5.8 \text{ mg/l}$$

Con un fin ilustrativo calcularemos el área necesaria para obtener una concentración de fósforo en el efluente de 0.5 mg/l usando la ecuación (33).

$$A_s = \frac{(100)(1000) \ln(12/0.5)}{2.74} = 115987 \text{ m}^2$$

Como podemos ver en el ejemplo anterior el área requerida para la instalación depende mucho de los requerimientos en salida; así, en la mayoría de los casos no es rentable eliminar fósforo por esta vía y se debe proporcionar una fuente complementaria de tratamiento para este fin si se requiere tener un bajo nivel en el efluente, y se dimensiona el humedal con el área requerida para la eliminación de nitrógeno.

El área necesaria para eliminar fósforo requiere 4 veces mayor que la de nitrógeno y 8 veces la de DBO.

Por último hay que recalcar que el diseño siempre se verá afectado por las condiciones topográficas del sitio, cuyas potenciales limitaciones no hemos tenido en cuenta.

APENDICE

LISTA DE FIGURAS

FIGURAS:	Págs.:
No.1 : Área Pantanosa de Natural.....	8
No.2 : Plantas acuáticas comunes	9
No.3 : Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial....	10
No.4 : Parque de la Exposición (a) y (b).....	19
No.6 : Laguna Artificial – Parque de la Exposición.....	23
No.7 : Phragmites Australis.....	24
No.8 : Diagrama de Flujo del Sistema Experimental.....	26
No.9 : Ubicación geográfica del Parque de la Exposición.....	27
No.10 : Tratamiento de Aguas Residuales en Humedales Artificiales	33
No.11 : Transformación del carbono en los suelos de los humedales	33
No.12 : Transformación del azufre en los suelos de los humedales...	34
No.13 : Transformación del Fósforo en humedales	34
No.14 : Transformación del Nitrógeno en humedales	35
No.15 : Proceso de Depuración de los humedales artificiales.....	36
No.16 : Rendimiento de remoción típicos.....	36
No.17 : DBO ₅ Entrada - contra DBO ₅ de salida en humedales artificiales	37
No.18 : Sólidos suspendidos entrada-salida en humedales artificiales	39
No.19 : Entrada de amoniacos contra salida de amoniacos.....	41
No.20 : Nitratos entrada-salida de nitratos.....	43
No.21 : Entrada contra salida de fósforo	44
No.22 : Plantas acuáticas típicas en humedales.....	47
No.23 : Estructura de salida con control de nivel	52

TABLAS:	Págs.:
No.1 : Costo de Mantenimiento de la lagunas artificiales.....	22
No.2 : Especies emergentes más utilizadas en depuración de Aguas Residuales	53
No.3 : Propiedades físicas del agua	63
No.4 : Características típicas de los medios para humedales (S.F.S)..	64
No.5 : Conductividad térmica de los componentes de humedales (SFS)	67
No.6 : Comparación del rendimiento de los humedales de Santee. (California, EE.UU) con y sin vegetación	70
No.7 : Oxígeno disponible por vegetación emergente de un humedal..	74
No.8 : Costo de Construcción para 138 m ² de un humedal.....	90

LISTA DE PLANOS

No.1 : Vista de la sección longitudinal y lateral del diseño del Humedal Artificial tipo sistema flujo subsuperficial (S.F.S)....	85
No.2 : Vista de Lagunas Artificiales y el diseño del humedal.....	86

CUADROS PRELIMINAR DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

MICROBIOLOGICO	Págs.:
No.1 : Primer cuadro del resultado del análisis microbiológico.....	92
No.2 : Segundo cuadro del resultado del análisis microbiológico ...	93
No.3 : Tercer cuadro del resultado del análisis microbiológico	93