

00521
101



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**HUMEDALES COMO UNA ALTERNATIVA
EN EL TRATAMIENTO DE AGUA**

La Dirección General de Bibliotecas de la
Universidad Nacional Autónoma de México
ha recibido en formato electrónico e impreso el
trabajo de tesis profesional:
Juan Carlos Muñoz Soberanes.
25/Julio/2003

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:
JUAN CARLOS MUÑOZ SOBERANES



EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA

MÉXICO, D.F.

2003





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

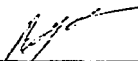
Jurado asignado:

Presidente: Prof. Rodolfo Torres Barrera
Vocal: Prof. Baldomero Pérez Gabriel
Secretario: Prof. Rina Guadalupe Aguirre Saldívar
1er Suplente: Prof. Alfonso Duran Moreno
2do Suplente: Prof. Bernal Pérez Rolando Javier

Sitio donde se desarrolló el tema:

División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería

Asesora del tema:



Prof. Rina Guadalupe Aguirre Saldívar

Sustentante:



Juan Carlos Muñoz Soberanes

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, sobre todo y por encima de todo doy las gracias a mi madre que siempre está cuando más la necesito, que siempre me ha exigido y que ha hecho de mí lo que soy hoy.
Gracias mamá.

A la memoria de mi abuelo Sebastián Soberanes.

A Paola por apoyarme en el desarrollo de esta tesis y por tener mas ganas que yo de verme terminar.

A mis hermanos.

Y muy en especial a la Dra. Rina Aguirre Saldivar por sus conocimientos, apoyo y su constante paciencia durante el desarrollo de esta tesis.

Prefacio

Este trabajo es uno de los resultados de las actividades del proyecto: **Programa de Manejo Integral de Contaminantes: San Miguel Topilejo (12216-711-7-v-02)**, realizado por la Sección de Ingeniería Ambiental de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para la Dirección de Regularización Territorial y Tenencia de la Tierra de la Delegación del Distrito Federal en Tlalpan (Aguirre et al. 2002).

Los resultados oficiales del mencionado proyecto se entregaron a la Delegación del Distrito Federal en Tlalpan, para la integración del Programa Parcial de Desarrollo correspondiente, citando en el presente trabajo solo la parte correspondiente al manejo y disposición de agua residual de los asentamientos irregulares.

ÍNDICE

	Página
Lista de tablas	5
Lista de figuras	6
Lista de variables	7
1 Introducción	8
1.1 Objetivo	10
1.2 Justificación	10
1.3 Alcances y limitaciones	10
2 Contaminación del agua	12
2.1 Características del agua residual	13
2.2 Normatividad	16
2.3 Tratamientos	17
2.3.1 Tratamientos individuales de aguas residuales	18
2.4 Humedales	21
2.4.1 Humedales naturales	23
2.4.2 Humedales artificiales	25
2.4.3 Componentes del humedal	27
3 Metodología	31
3.1 Parámetros de diseño	31
3.2 Ecuaciones de diseño	35
3.2.1 Sistema FWS	38
3.2.2 Sistema SFS	40
4 Caso de aplicación	43
4.1 Características del sitio de estudio	43
4.1.1 Situación ambiental	48
4.1.2 Asentamientos irregulares de estudio	52
4.1.3 Alternativas de solución	54
4.2 Diseño de humedales	56
4.2.1 Humedal FWS	60
4.2.2 Humedal SFS	63
4.3 Discusión general	66
4.3.1 Costos	66
4.3.2 Programa de mantenimiento de humedales	72
5 Conclusiones y recomendaciones	74

6. Bibliografía

**TESIS
CON
FALLA DE
ORIGEN**

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 2 1 Composición media de la orina de origen humano	13
Tabla 2 2 Normas Oficiales Mexicanas en materia de agua	17
Tabla 2 3 Mecanismos de remoción en humedales	30
Tabla 3 1 Conductividad térmica	37
Tabla 3 2 Factor de resistencia de Manning	38
Tabla 3 3 Características típicas de los medios para humedales SFS	40
Tabla 3 4 Valores indicativos para el diseño de humedales artificiales	41
Tabla 4 1 Temperaturas extremas y número de días de ocurrencia (1987)	57
Tabla 4 2 Consumo doméstico per capita	58
Tabla 4 3 Composición típica del agua residual doméstica (mg/L)	59
Tabla 4 4 Composición típica del agua residual doméstica (mg/L)	60
Tabla 4 5 Resultados	66
Tabla 4 6 Programa de mantenimiento	71
Tabla A 1 1 Costos de la instalación de humedal artificial tipo SFS.	77
Tabla A 1 2 Costos de la instalación de fosas sépticas prefabricadas.	77
Tabla A 1 3 Costos de la instalación de baños secos con cámaras subterráneas.	78
Tabla A 1 4 Costos de la construcción de baños secos (con materiales económicos)	78

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2 1 Organismos presentes en aguas residuales	16
Figura 2 2 Sistema de fosa septica tipo	18
Figura 2 3 Camaras subterranas caseta u asentamiento móvil	20
Figura 2 4 Humedal natural	23
Figura 2 5 Sistema a flujo libre (FWS)	25
Figura 2 6 Sistema de flujo sub-superficial (SFS)	25
Figura 2 7 Cielo del oxigeno disuelto en un humedal	26
Figura 2 8 Seccion transversal de un sistema de flujo interno	28
Figura 2 9 Plantas acuaticas comunes	28
Figura 3 1 Comportamiento del DBO en humedales artificiales	32
Figura 3 2 Cielo del Nitrogeno en los humedales	34
Figura 4 1 Suelo de conservacion por Delegacion Politica	44
Figura 4 2 Delegaciones del Distrito Federal	46
Figura 4 3 San Miguel Topilejo	47
Figura 4 4 Sistemas de almacenamiento	50
Figura 4 5 Sistema de alcantarillado	51
Figura 4 6 Descargas de agua residual a la via publica	52
Figura 4 7 Estrella Mora (croquis topografico)	53
Figura 4 8 Subestacion Electrica (croquis topográfico)	54
Figura 4 9 Temperatura promedio en la delegación Tlalpan	57
Figura 4 10 Vista de perfil humedal FWS	67
Figura 4 11 Vista Superior Humedal FWS	67
Figura 4 12 Vista de perfil Humedal SFS	68
Figura 4 13 Vista Superior Humedal SFS	68
Figura 4 14 Arreglo final Humedal SFS	69
Figura 4 15 Distribucion de humedales en Estrella Mora	70
Figura 4 16 Distribucion de humedales en Subestación Eléctrica	71

LISTA DE VARIABLES

Símbolo	Nombre de la variable	Unidad
α	Factor de resistencia.	$s.m^{1.0}$
$-A$	Fración de DBO_5 no eliminada por la sedimentación a la entrada del sistema.	
A_s	Área superficial del humedal.	m^2
A_v	Superficie específica de actividad microbiológica.	m^2/m^3
C_e	Concentración del contaminante en el efluente.	mg/L
C_{in}	Concentración del contaminante en el afluente.	mg/L
C_n	Concentración de nitratos en el afluente	mg/L
D	Tamaño efectivo (diámetro) del material del humedal.	mm
DBO_5	Demanda biológica de oxígeno	mg/L
k_1, k_2, k_3, k_4	Conductividad térmica en la capa "n"	W/m^2C
k_s	Conductividad hidráulica	$m^3/m^2/d$
K_{NH}	Constante de nitrificación a 20°C	dia^{-1}
K_1	Constante de reacción de primer orden.	dia^{-1}
L	Largo del humedal	m
m	Gradiente hidráulico	$\%$
M	Coefficiente de Manning	$s/m^{1.48}$
n	Porosidad o espacio disponible para el flujo	
Q	Caudal medio a través del humedal	m^3/d
Q_e	Caudal de entrada	m^3/d
Q_s	Caudal de salida	m^3/d
q_p	Energía ganada por el agua del sistema	cal
q_r	Calor perdido por el sistema	cal
r_z	Porcentaje de la profundidad del lecho del humedal SFS ocupado por la zona de las raíces.	
S	Gradiente hidráulico	m/m
t	Tiempo de retención hidráulica	dia
T_e	Temperatura del agua que entra al humedal.	$^{\circ}C$
T_a	Temperatura promedio del aire	$^{\circ}C$
T_e	Temperatura del efluente del humedal	$^{\circ}C$
T_w	Temperatura promedio del agua en el humedal.	$^{\circ}C$
T_s	Cambio de temperatura en el humedal.	$^{\circ}C$
U	Coefficiente global de transferencia de calor	W/m^2
v	Velocidad de flujo	m/s
W	Ancho del humedal	m
x	Profundidad del agua en el humedal.	m
x_1, x_2, x_3, x_4	Espesor de la capa "n"	m

I. INTRODUCCIÓN

La historia de las relaciones del hombre con la naturaleza es inseparable de la historia del desarrollo del hombre. Sin embargo, solo recientemente éste ha tomado conciencia de que los recursos naturales del planeta donde vive son finitos e indispensables para mantener la vida en la Tierra. Por ello, los problemas ambientales han despertado gran preocupación, pues el deterioro de los ecosistemas ha alcanzado dimensiones alarmantes y actualmente no solo amenaza la calidad de vida del hombre, sino la vida misma del planeta.

En los últimos años, los problemas ambientales de los países subdesarrollados se han agudizado: su impacto sobre el ambiente es cada día más grave y afecta a un número mayor de personas. Además, estos países, no han podido resolver sus viejos problemas de falta de vivienda, insuficiente abastecimiento de agua potable y alcantarillado, manejo inadecuado de basura, y enfermedades asociadas a estas carencias (como gastroenteritis, parasitosis y problemas respiratorios), enfrentan el impacto negativo producido por el ruido, además de la contaminación de los suelos, de la atmósfera y del agua por sustancias peligrosas (Sehteingart, 1991).

Ante la dimensión de los problemas actuales de contaminación, principalmente en países como el nuestro, es adecuado seleccionar uno de los problemas en particular para su estudio y búsqueda de soluciones. En este caso es de interés la contaminación del agua por las actividades domésticas de viviendas de escasos recursos.

El agua, es un recurso vital para la subsistencia del ser humano y uno de los más importantes para impulsar el desarrollo de las comunidades (Sehteingart, 1991). En la actualidad se sabe que su disponibilidad es limitada, pues, para que ésta sea útil para los diferentes usos, se tiene que considerar no solo la cantidad, sino las características físico-químicas y bacteriológicas necesarias (Athie, 1987).

Según datos estimativos publicados por la UNESCO en 1978, el volumen total de agua que participa en el ciclo hidrológico es de aproximadamente 1.386 millones de kilómetros cúbicos, de los cuales:

- el 97.5 % es agua salada.
- el 2.24 % es agua dulce, conformada por las aguas congeladas en las profundidades de la Antártida y en las aguas subterráneas profundas.
- y el 0.26 % es agua dulce accesible para el consumo humano y se encuentra en los lagos, embalses, suelos y acuíferos poco profundos.

Esta mínima fracción de agua accesible es la principal componente de los recursos hídricos en la Tierra y depende directamente de la precipitación pluvial y el deshielo de los glaciares, completado por el rocío y la niebla en ciertos lugares (Senamhi, 2002).

En México, como en el resto del mundo, el ciclo del agua ha sufrido cambios, sobre todo a consecuencia de los procesos de urbanización e industrialización, así como por la mala distribución poblacional, lo que ha ocasionado un aumento en la demanda de este recurso y disminución de su calidad. En niños menores de cinco años de edad, la segunda causa de morbi-mortalidad sigue siendo las enfermedades gastrointestinales y uno de los vehículos de transmisión más importantes es el agua (Scheingart, 1991).

El fenómeno de crecimiento en la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), sobrepasó las zonas de desarrollo urbano de los planes delegacionales, dando como resultado el surgimiento de numerosos asentamientos semiurbanos, que no cuentan con la infraestructura de servicios públicos, ocasionando problemas ambientales.

En el caso del agua residual, ésta se vierte sin tratamiento directamente al suelo, provocando afectaciones a los cuerpos de agua subterráneos y daños a la salud pública.

Por lo anterior, el presente trabajo busca plantear como alternativa para el tratamiento de aguas residuales de asentamientos irregulares el desarrollo de humedales artificiales.

1.1 OBJETIVO

Analizar la posible aplicación de humedales artificiales, en zonas semiurbanas de la ZMCM, como método de tratamiento de las aguas residuales.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El crecimiento de la población en la Ciudad de México ha provocado la creación de asentamientos semiurbanos que no cuentan con el servicio de recolección, tratamiento y evacuación de las aguas residuales; provocando problemas de contaminación en las regiones receptoras, con un impacto negativo para la agricultura y para la salud de la población. Es por esto que, en el presente trabajo se plantea la aplicación de humedales artificiales como una alternativa para el tratamiento de aguas residuales antes de su disposición, considerando sus bajos costos de construcción y operación, así como por los requerimientos mínimos de personal capacitado para su manejo.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Para cumplir con el objetivo de este trabajo se han establecido los siguientes alcances y limitaciones:

- Revisar información sobre humedales naturales y artificiales en textos impresos y en medio electrónicos.
- Seleccionar el tipo de humedal más adecuado para uno de los asentamientos irregulares de la delegación de Tlalpan.
- Realizar el análisis económico del humedal seleccionado.

Para realizar estas actividades debe establecerse que:

- La información necesaria para el diseño de los humedales fue proporcionada por la delegación de Tlalpan.
- No se realizaron pruebas de campo, ni se llegó a la etapa de instalación del humedal diseñado.

En el capítulo siguiente, antes de presentar el desarrollo del diseño de humedales, se revisarán algunos conceptos básicos de contaminación del agua, métodos de tratamientos y los fundamentos técnicos del funcionamiento de los humedales.

2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El agua es un líquido incoloro, inodoro e insípido, formado por hidrógeno y oxígeno (H_2O) Es el mayor constituyente de los seres vivos y, por lo tanto, de sus alimentos; sin ella no sería posible la vida en la Tierra.

La superficie de la Tierra está cubierta por agua en sus tres cuartas partes, lo que destaca su importancia como objeto de estudio. Su cantidad se mantiene constante de forma dinámica, mediante un proceso conocido como *ciclo hidrológico* o *ciclo del agua*, en el que el agua cambia su estado físico produciéndose intercambios entre las distintas partes de la biosfera (atmósfera, litosfera e hidrosfera), en los que la energía solar juega un papel fundamental (Jarabo, 2000).

La presencia de fuentes de agua ha sido decisiva en el desarrollo de las sociedades humanas, llegando a influir no solo en el mantenimiento de la vida, sino en el crecimiento económico y la calidad de vida.

El agua, tiene importantes aplicaciones como son: consumo humano, sostenimiento de la fauna acuática, producción agrícola e industrial, generación de energía eléctrica, navegación, recreo y evacuación de residuos. Todas estas actividades demandan agua, sin embargo, no todas ellas la consumen. La *demanda* es la cantidad de agua que se requiere para un uso determinado, mientras que el *consumo* es la cantidad de agua que deja de estar disponible después de su utilización (Jarabo, 2000).

La calidad del agua puede verse totalmente alterada según la utilización que se haga de ella. Así, algunos usos del agua generan las llamadas *aguas residuales* (efluentes de actividades domésticas, agrícolas e industriales).

A continuación se revisarán algunos conceptos básicos que serán empleados a lo largo de este trabajo.

2.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL

El agua residual urbana es aquella proveniente de usos domésticos (inodoros, fregaderos, lavadoras, lavabos y sanitarios), arrastra principalmente excretas y residuos orgánicos, recibe también el nombre de *aguas negras*. Puede contener también, algún residuo del arrastre del agua de lluvia y de actividades de la microindustria existentes en la zona.

Las excretas, son los residuos sólidos y líquidos producidos por el proceso digestivo de seres humanos y animales. Por su concentración en las aguas municipales, son el componente principal a considerar en el diseño de sistemas de depuración de ésta.

Los vertidos están divididos en líquido y deyecciones sólidas; contienen nitrógeno (N), ácido fosfórico (H_2PO_4) y óxido de potasio (K_2O), (con composición media de 0.8, 0.9 y 5.1 kg/año-persona, respectivamente), además de otros compuestos como celulosa, lípidos y protidos. Los vertidos líquidos (orina), tiene la composición que se presenta en la tabla 2.1. Un hombre elimina en forma promedio 1.3 litros de orina al día y 44 kg/año de excretas (Seoanez, 1999).

Tabla 2.1 Composición media de la orina de origen humano

Cationes (µ/L)		Aniones (µ/L)		Pigmentos	Compuestos orgánicos (µ/L)	
Na	6				Urea [$CO(NH_2)_2$]	30
K	2.7	Cl	8.6	Urocromo	Acido lipúrico	1.5
NH_4	0.8	SO_4	2.2	Urobilina	Creatinina	1.8
Ca	5.3	PO_4	3.8	Uroporfirina	Acido úrico	0.7
Mg	0.15				Bases púricas	0.3
					Aminoácidos	0.5
					Acidos grasos	0.5
					Alcoholes	
					Glucidos	

Fuente: Seoanez, 1999

Otro aporte importante a las aguas residuales urbanas son las descargas de la cocina y del lavado (jabones, detergentes sintéticos con espumantes, sales, celulosa, almidón, glucógeno y partículas orgánicas), insecticidas, etc. (Seoáñez, 1999).

TESIS CON
 FALLA DE CUBIEN

La lluvia, arrastra partículas de las superficies expuestas (hollín, polvo y esporas), por lo que debemos tomarlo en cuenta para los procesos de depuración, debido a que aumenta el volumen de agua y diluye los contaminantes.

Para conocer la composición del agua residual, su peligrosidad potencial y las posibles formas de reuso, es preciso conocer las características de cada uno de los efluentes que conforman la corriente final. Esta composición varía principalmente por las costumbres higiénicas de la población objeto de estudio y por la presencia de industrias.

Para definir el grado de contaminación del agua se utilizan los siguientes parámetros:

Sólidos. Los sólidos disueltos, en suspensión y flotantes, que contiene el agua residual normalmente no pasan de 1.000 mg/L. Estos sólidos pueden ser orgánicos (de origen vegetal o animal), e inorgánicos, y pueden contener nutrientes a base de nitrógeno, fósforo o azufre en forma de amoníaco, nitritos, nitratos, fosfatos, sulfitos, sulfuros y sulfatos.

Los sólidos se clasifican según su presentación en:

- **Sólidos sedimentables.** Aquellas partículas que se depositan, por gravedad. Generalmente se componen de un 70 % de sólidos orgánicos y 30 % de inorgánicos.
- **Sólidos en suspensión.** Son partículas flotantes, como trozos de vegetales, animales y basuras, que se pueden separar del líquido por medios físicos, como la filtración.
- **Coloides.** Son partículas de tamaño intermedio $1m\mu < \phi < 0.2\mu$, se calcula que están constituidos por un 75% de componentes orgánicos y 25% de inorgánicos. Pueden separarse por coagulación – floculación y su presencia le da al líquido una apariencia nebulosa, conocida como turbidez.
- **Sólidos disueltos.** Están compuestos de moléculas orgánicas, inorgánicas e iones disueltos. Pueden separarse por coagulación, precipitación o filtración con membranas.

Gases disueltos. Entre los gases contaminantes presentes están:

- **Ácido sulfhídrico.** Este gas se forma al descomponerse en medio aerobio, compuestos orgánicos e inorgánicos que contienen azufre. Su presencia, se manifiesta fundamentalmente por el olor desagradable, es poco estable descomponiéndose en azufre e hidrógeno.

- **Anhídrido carbónico o bióxido de carbono.** Este se produce en la fermentación de los compuestos orgánicos de aguas residuales; se presenta libre o como componente de bicarbonatos.
- **Metano.** Se forma por la descomposición anaerobia de la materia orgánica.

Aceites y grasas. Estos provienen de residuos de mantequilla, aceite y grasa vegetal de alimentos, y grasa que se desprende de la ropa de lavado. Las grasas se encuentran entre los compuestos orgánicos más estables y no son fácilmente descompuestos por acción bacteriana. Las aguas residuales urbanas contienen además aceites específicos como gasolina y petróleo.

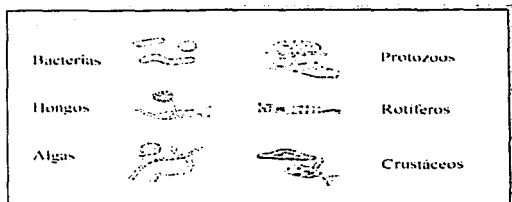
Microorganismos patógenos. El agua residual, puede contener un gran número de organismos vivos que mantienen la actividad biológica, produciendo fermentaciones y degradación de la materia orgánica e inorgánica presente, pero además pueden producir enfermedades al ser humano (figura 2.1). Algunos de los organismos más importantes en las aguas residuales son:

- **Mohos.** Hongos que se implantan en la materia orgánica en descomposición. Atacan a los carbohidratos y a los productos nitrogenados. Los más importantes son: *Mucor*, *Oidium*, *Aspergillus* y *Penicillium*.
- **Bacterias.** Organismos unicelulares microscópicos cuyo tamaño varía de 0.5 a 6 micras, se alimentan de material orgánico e inorgánico soluble. En función de su metabolismo las bacterias se clasifican en autótrofas, si su fuente de carbón proviene de sustancias inorgánicas, y heterótrofas, si la fuente es orgánica. Las bacterias pueden ser aerobias, anaerobias o facultativas en función de las necesidades de oxígeno para su respiración. Las bacterias aerobias necesitan oxígeno disuelto en el agua para su respiración, las anaerobias toman el oxígeno de los sólidos orgánicos e inorgánicos que degradan y las facultativas pueden llegar a adaptarse al medio opuesto.

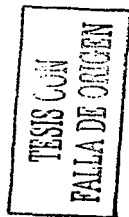
2.2 NORMATIVIDAD

En nuestro país, la normatividad ambiental tiene sus orígenes en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en los artículos 4º (Protección de la salud), 27 (Propiedad, cuidado y conservación de las aguas y recursos naturales) y 73, fracción XVI (Consejo de Salubridad General). De estos artículos se deriva la Ley Federal de Aguas Nacionales y las Leyes generales en lo que respecta a la salud y el ambiente.

Figura 2.1 Organismos presentes en aguas residuales.



Fuente: López, 2000.



De las Leyes se derivan los Reglamentos: como el Reglamento de las Aguas Nacionales; el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación de las Aguas, donde se establecen las características de los cuerpos de agua.

Y, finalmente, de los Reglamentos se derivan las Normas, que establecen las características de las descargas a los cuerpos receptores y otras que determinan las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua potable. En materia de agua las principales normas a considerar son:

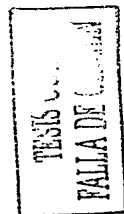
La Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua y bienes nacionales. Con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos. Siendo obligatoria para los responsables de dicha descargas.

Esta norma define las aguas residuales como "aquellas provenientes de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso así como la mezcla de ellas".

Los compuestos y parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales en lo que corresponde a esta norma se consideran: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno, fósforo, temperatura y pH. En la tabla 2.2 se resumen las normas mexicanas básicas en materia de agua

Tabla 2.2 Normas Oficiales Mexicanas en materia de agua

Normas Oficiales Mexicanas	
NOM-001-ECOL	Descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales
NOM-002-ECOL	Contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano municipal
NOM-003-ECOL	Límites de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reusen en servicio al público
NOM-127-SSA1	Límites de permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización
NOM-180-SSA1	Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Equipos de tratamiento de tipo doméstico. Requisitos sanitarios



2.3 TRATAMIENTOS

Para encontrar la solución apropiada a un problema de contaminación de agua, es necesario analizar las técnicas de tratamiento existentes y aplicar criterios tecnológicos, económicos y sociales para su selección.

En general, los objetivos principales del tratamiento de aguas residuales son:

- remoción de sólidos
- eliminación de material orgánico biodegradable
- eliminación de organismos patógenos

Esto se logra a través de medios físicos y procesos unitarios conocidos como tratamientos primario, secundario y terciario

- Tratamiento primario. Sedimentación, cribado, flotación, filtración, mezcla, floculación y homogenización

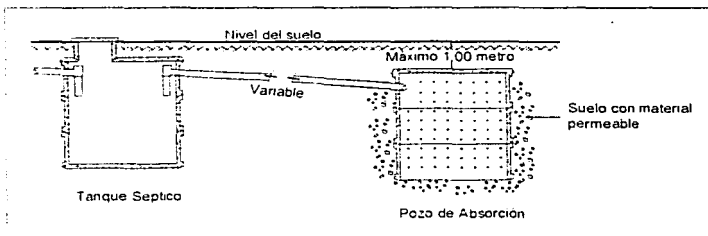
- Tratamiento secundario Aerobio (lodos activados, filtros percoladores, lagunas de estabilización, lagunas aereadas y tanques sépticos), anaerobios (filtros anaerobios, manto de lodos y lechos ascendentes), humedales (flujo libre y flujo subsuperficial).
- Tratamiento terciario. Oxidación química, reducción química, adsorción, cloración, osmosis inversa, Ozonación e intercambio iónico.

Teniendo en cuenta que el costo de construir y operar instalaciones de tratamiento avanzado de agua residual es bastante alto, existe un renovado interés en métodos alternativos para el tratamiento de aguas residuales. Entre estos métodos se encuentran las fosas sépticas, baños secos y humedales artificiales, que comparados con los sistemas convencionales, no utilizan energía eléctrica, utilizan menos mano de obra para su mantenimiento y su operación es relativamente económica y sencilla.

2.3.1 TRATAMIENTOS INDIVIDUALES DE AGUAS RESIDUALES

Fosas sépticas. Se componen, de acuerdo con lo establecido en la NOM-006-CNA-1997, que establece las especificaciones y métodos de prueba para fosas sépticas prefabricadas, de dos unidades (ver figura 2.2). En la primera se llevan a cabo los procesos de sedimentación y degradación de la materia orgánica por digestión anaerobia, y en la segunda el proceso de oxidación del efluente séptico y su descarga al subsuelo.

Figura 2.2 Sistema de fosa séptica tipo



TESIS CON
FALLA DE COPIAR

Las fosas deben recibir mantenimiento preventivo cada seis meses, el cual consistente en una inspección visual para retirar obstrucciones en tuberías, y mantenimiento mayor cada año para extraer los lodos acumulados en el fondo. Los sistemas implementados de esta forma estarían en posibilidad de remover hasta el 60% de la carga orgánica contaminante presente en el agua residual (Metcalf y Eddy, 1991)

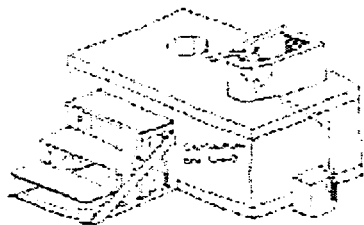
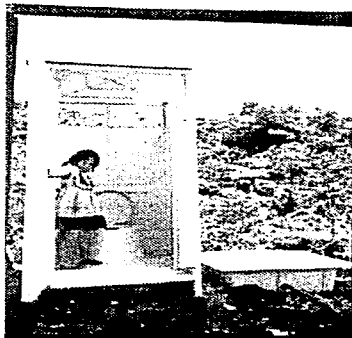
Las fosas sépticas pueden utilizarse en los ámbitos urbano y rural como unidades específicas de evacuación y tratamiento para evitar la contaminación de las fuentes de abastecimiento de agua potable, ya sean superficiales o subterráneas, sobre todo en sitios donde se tengan formaciones geológicas que hacen costoso un sistema de alcantarillado o cuando la población está bastante dispersa o bien, cuando no se tenga agua en disponibilidad suficiente para realizar el desalojo mediante un sistema hidráulico adecuado.

Sin embargo estos sistemas no son capaces de remover la carga de contaminantes de las aguas residuales para su reuso.

Sanitarios secos. El uso de sanitarios secos representa otra posible solución para reducir la descarga de aguas residuales al subsuelo. El saneamiento seco es una adaptación de la antigua práctica de manejar las excretas humanas sin el uso de agua, y por tanto, sin drenaje. El uso de este sistema implica: sanitarios que no requieren de agua para su funcionamiento, tratamiento de las excretas en el mismo lugar de su generación y producción de abono fértil.

Sus beneficios incluyen el ahorro de una gran cantidad de agua dentro de los hogares (hasta un 40%, Cordova, 2001), la reducción de descargas contaminantes a los mantos freáticos, inhibición de organismos patógenos (al permanecer los residuos más tiempo en un medio alcalino), y generación de nutrientes que pueden ser posteriormente aplicados a cultivos agrícolas. El sistema consta de dos cámaras subterráneas, un asiento y una estructura o caseta móviles (figura 2.3)

Figura 2.3
Camaras subterranas, caseta y asiento móvil



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las camaras del sistema se utilizan alternadamente, mientras una se llena la otra se encuentra en proceso de desecacion. La orina se conduce mediante una manguera, se almacena o se vierte directamente al suelo como fertilizante liquido, mientras que el excremento se deposita en una de las camaras y se cubre con una mezcla de cal o ceniza con tierra, cuando la camara en uso esta a punto de llenarse la otra se vacía y su contenido puede utilizarse como acondicionador de suelos.

Estos sistemas como se mencionó reducirían hasta un 40 % de aguas residuales domésticas, sin embargo, implican un mayor mantenimiento y control que otros sistemas, además de la utilización de otros sistemas para el tratamiento del agua residual generada por las demás actividades del hogar.

Este trabajo presenta como mejor alternativa para tratamiento de aguas residuales los humedales artificiales

2.4 HUMEDALES

La palabra humedal se deriva de "*húmedo*", que quiere decir cubierto o saturado de un líquido. Entonces, se llaman humedales a aquellas áreas que se encuentran inundadas por aguas dulces o salinas, temporal o permanentemente. Son ecosistemas muy productivos, que proporcionan casi dos tercios de la pesca mundial. Casi todos los países tienen humedales de algún tipo.

Los humedales pueden ser naturales o artificiales. Entre los *humedales naturales* podemos citar a las lagunas costeras, esteros, barras, manglares, pantanos y lagos de agua dulce, y entre los *artificiales* las presas, lagos artificiales, estanques acuícolas y salinas artificiales.

En el pasado, los humedales eran considerados lugares inhóspitos, llenos de insectos y fuentes de enfermedades, cuyo mejor fin era ser desecados y utilizados para otros propósitos. Sin embargo, en los últimos años se ha reevaluado la importancia de estos sistemas, avanzando en el conocimiento de sus funciones, estableciendo que como sistemas de tratamiento de agua reúnen las siguientes tres características:

- fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica,
- utilizar y transformar los elementos por medio de microorganismos,
- lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

La *Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza* (IUCN por sus siglas en inglés, *International Union for Conservation of Nature*) en su primera Convención sobre Humedales de Importancia Internacional, especialmente como hábitat de aves acuáticas, mejor conocida como **Convención Ramsar**, adoptó una propuesta para determinar los humedales que se incluirían bajo su protección.

En el marco de esta convención se definen los humedales como:

"... extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, ya sea de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de aguas marinas, cuya profundidad en

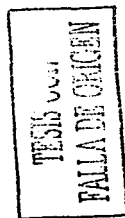
marca baja no excede los seis metros". Esta definición fue adoptada desde 1971 (Convención Ramsar, 1993).

Otra definición adoptada por los científicos del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos (USFWS, por sus siglas en inglés *United States Fishing Wild Service*), y presentada en el reporte titulado *"Clasificación de Humedales y Hábitats de Aguas Profundas de los Estados Unidos"*, es:

"... áreas en donde la saturación con agua es el factor dominante que determina la naturaleza del desarrollo del suelo y del tipo de comunidades de plantas y animales que viven en el suelo o en su superficie. La característica que todos los humedales comparten, es que el suelo o el sustrato están, al menos periódicamente, saturado o cubierto con agua. Los humedales son áreas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, en donde el nivel freático usualmente está a nivel de superficie o cerca de ésta, o la superficie está cubierta por aguas someras".

Esta definición es una de las más aceptadas, ya que es amplia, flexible y comprensible, e incluye descripciones de vegetación, hidrología y suelos.

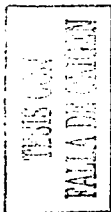
Es difícil encontrar una definición del término humedal que sea definitiva y que satisfaga a todos los interesados. Esta variación, es el resultado natural del enfoque diferente que se le da, de acuerdo al campo de estudio, y de las diferentes maneras en que cada una de las disciplinas interactúa con los humedales. Para los propósitos de esta tesis se adoptará la primera definición mencionada.



2.4.1 HUMEDALES NATURALES

Como ya se mencionó, los humedales son áreas saturadas por agua superficial o subterránea con profundidades inferiores a 60 cm, y plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos. Esta vegetación proporciona superficie para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la absorción de los constituyentes del agua residual y permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua (Lara, 1999).

Figura 2.4 Humedal Natural



Clasificación de Humedales. La siguiente clasificación la realizó la IUCN en la Convención Ramsar. Las categorías enumeradas a continuación, sólo tienen por objeto aportar un marco que facilite la identificación rápida de los principales hábitat de los humedales representantes de diferentes sitios.

Humedales marinos y costeros

Aguas marinas someras permanentes, en la mayoría de los casos, de menos de seis metros de profundidad en marea baja. Incluyen bahías y estrechos.

Lechos marinos submareales, incluyen praderas de algas, pastos marinos y marinas mixtas tropicales

Costas marinas rocosas, incluyen islotes rocosos y acantilados.

Playas de arena o de guijarros, incluyen barreras, bancos, cordones, puntas e islotes de arena. También incluyen sistemas y hondonales de dunas

Estuarios, Aguas permanentes de estuarios y sistemas estuarinos de deltas.

Bajos intermareales de lodo, arena o con suelos salinos ("saladillos").

Pantanos y esteros (zonas inundadas) intermareales, incluye marismas y zonas inundadas con agua salada, praderas halófilas, salitrales, zonas elevadas inundadas con agua salada, zonas de agua dulce y salobre inundadas por la marea

Humedales intermareales arbolados. incluyen manglares, pantanos de "nipa", bosques inundados o inundables, mareasles de agua dulce.

Lagunas costeras salobres/saladas Lagunas con, por lo menos, una relativamente angosta conexión al mar.

Deltas interiores (permanentes).

Ríos/arroyos permanentes. incluye cascadas y cataratas.

Ríos/arroyos estacionales/intermitentes/irregulares

Lagos permanentes de agua dulce (de más de 8 ha).

Lagos estacionales/intermitentes de agua dulce (de más de 8 ha), incluye lagos en llanuras de inundación.

Lagos permanentes salinos/salobres/alcalinos.

Lagos y zonas inundadas estacionales/intermitentes salinos/salobres/alcalinos.

Pantanos/esteros/charcas permanentes salinas/salobres/alcalinos.

Pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes salinos/salobres/alcalinos.

Pantanos/esteros/charcas permanentes de agua dulce; charcas (de menos de 8 ha), pantanos y esteros sobre suelos inorgánicos, con vegetación emergente en agua por lo menos durante la mayor parte del periodo de crecimiento

Pantanos/esteros/charcas estacionales/intermitentes de agua dulce sobre suelos inorgánicos, incluye depresiones inundadas (lagunas de carga y recarga), "potholes", praderas inundadas estacionalmente, pantanos de ciperáceas.

Turberas no arboladas, incluye turberas arbustivas o abiertas ("bogs"), turberas de gramíneas o carrizo ("fens"), bofedales y turberas bajas.

Humedales alpinos/de montaña, incluye praderas alpinas y de montaña, aguas estacionales originadas por el deshielo

Humedales de la tundra, incluye charcas y aguas estacionales originadas por el deshielo.

Pantanos con vegetación arbustiva, incluye pantanos y esteros de agua dulce dominados por vegetación arbustiva, turberas arbustivas, arbustales de *Alnus sp.* sobre suelos orgánicos.

Humedales boscosos de agua dulce, incluye bosques pantanosos de agua dulce, bosques inundados estacionalmente, pantanos arbolados sobre suelos inorgánicos.

Turberas arboladas, bosques inundados turbosos

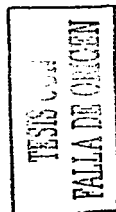
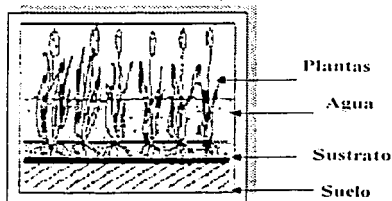
Manantiales de agua dulce, oasis.

Humedales geotérmicos

2.4.2 HUMEDALES ARTIFICIALES

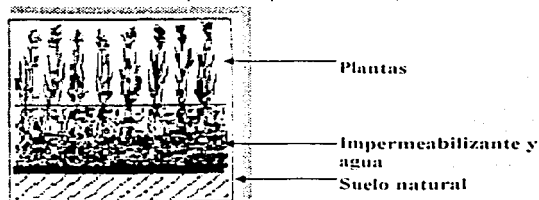
Existen básicamente dos tipos de humedales artificiales que se pueden utilizar en el tratamiento de aguas residuales urbanas, el sistema de flujo libre (FWS por sus siglas en inglés, *Free Water Surface*) y el sistema de flujo sub-superficial (SFS, *Subsurface Flow System*). El humedal tipo FWS, se caracteriza porque el nivel del agua está sobre la superficie del terreno, la vegetación está fijamente sembrada y el agua fluye sobre el impermeabilizante (ver figura 2.5).

Figura 2.5 Sistema a flujo libre (FWS)



En los humedales SFS el agua fluye a través de la cama impermeabilizante de arena o grava, y las raíces de las plantas se sostienen en dicha cama, el flujo del agua puede ser horizontal o vertical, de este último se tiene poca información, siendo el flujo horizontal el recomendado por la bibliografía para el tratamiento de aguas residuales (ver figura 2.6).

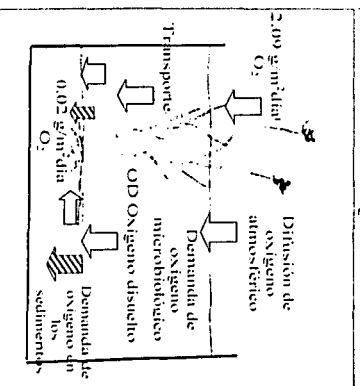
Figura 2.6 Sistema de flujo sub-superficial (SFS)



Fuente: EPA, 1988

1) El funcionamiento de estos sistemas, se basa en la formación de una película bacteriana en la superficie, proporcionada por la vegetación, facilitando la filtración y la adsorción de los contaminantes del agua residual. La vegetación, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua a través de las raíces, siendo ésta más profunda que la difusión del oxígeno atmosférico (ver figura 2.5). Los organismos microscópicos presentes en las humedales asimilan, transforman y reciclan varios constituyentes químicos que se encuentran en las aguas residuales.

Figura 2.5 Ciclo del oxígeno disuelto en un humedal



Fuente: Kadlec y Knight, 1996.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los dos tipos de humedales requieren que se coloque una barrera impermeable para impedir que se contamine el subsuelo con agua residual; esta puede ser de arcilla o algún otro material compactado hasta un estado cercano a la impermeabilidad, o bien una capa de asfalto o algún tipo de membrana. Además, requieren de condiciones de flujo uniforme para alcanzar el rendimiento esperado, lo cual se logra mediante el diseño de pequeños sistemas, con tuberías transversales de distribución a la entrada y la salida.

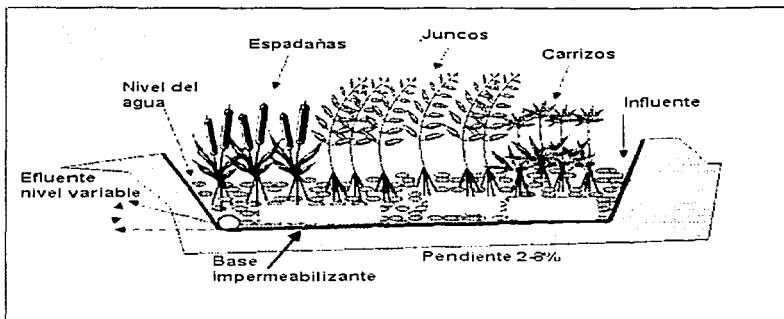
2.4.3 COMPONENTES DEL HUMEDAL

Los componentes de un humedal son: agua, vegetación, sustratos (como suelo impermeable, que prevenga la filtración del agua al subsuelo, grava y roca en el caso de los sistemas de SFS) y microorganismos desarrollados naturalmente (figura 2.6). Estas condiciones, pueden crearse para construir un humedal artificial casi en cualquier parte, la figura muestra la sección transversal de un sistema SFS, los sistemas FWS no incluyen la capa de grava o roca ver figuras 2.5 y 2.6.

Las plantas que se utilizan frecuentemente en estos sistemas son: espadañas (*Nypha*), carrizos (*Phragmites*), juncos (*Scirpus*) y juncos de laguna. Los juncos de laguna y las espadañas o una combinación de ambas son las dominantes en humedales artificiales (figura 2.8).

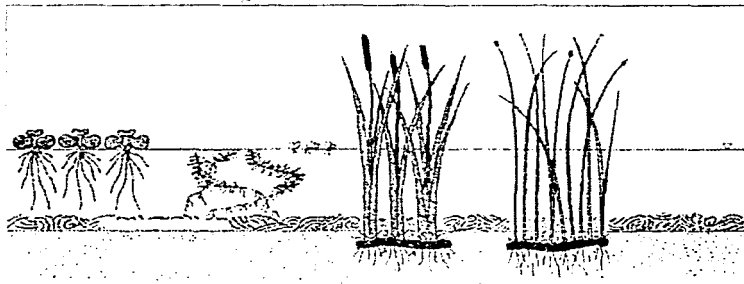
Las espadañas, son capaces de crecer en condiciones muy diversas y se propagan fácilmente, pero tienen una penetración relativamente baja en la grava, por lo que no se recomienda para los sistemas SFS. Los juncos, son capaces de crecer con solamente 5 cm de profundidad disponible de suelo fértil y temperaturas entre 16 y 27°C, pueden crecer en agua con pH entre 4 y 9, su penetración en grava es alrededor de 0.6 m, por lo que se recomienda su uso en los sistemas SFS. Los sistemas que utilizan carrizos han demostrado ser más eficientes en la transferencia de oxígeno, porque los rizomas penetran verticalmente y a mayor profundidad que los de las espadañas, aunque menos que los juncos (0.4 m).

Figura 2.8 Sección transversal de un sistema de flujo interno, SFS



ITESMI, 2007

Figura 2.9 Plantas acuáticas comunes



Fuente: Metcalf y Eddy, 1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las hojas y tallos muertos, se degradan y participan como sustrato para el crecimiento de la película microbiana responsable del tratamiento. La vegetación también favorece el tratamiento, dando lugar a bajas velocidades que incrementan la sedimentación de materiales suspendidos, el tiempo de retención y la superficie de contacto, estabiliza el

sustrato y limita la canalización, además de incorporar a sus tejidos el carbono, nutrientes y elementos de traza, y permitir la transferencia de gases entre la atmósfera y los sedimentos. El tallo y la raíz proporcionan un sitio para la fijación de microorganismos.

Los humedales pueden reducir significativamente la materia orgánica (como DBO_5), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como metales pesados, compuestos orgánicos y microorganismos patógenos. Los mecanismos de tratamiento involucrados son numerosos y se resumen en la tabla 2.3.

En cuanto al rendimiento de los humedales artificiales, se puede decir que tratan con eficiencia (superior al 80%) niveles altos de materia orgánica (400 mg/L como DBO_5 (Metcalf y Eddy, 1996)). El nitrógeno puede ser removido en rangos de 25 al 80%, los SS (sólidos suspendidos) se retienen con eficiencias de entre 56 y 95, la eliminación de fósforo es mínima y otros contaminantes como metales, trazas orgánicas y organismos patógenos también llegan a ser removidos (ITESM, 2003).

La remoción de los sólidos suspendidos es muy efectiva tanto en los sistemas FWS como en los SFS, debida principalmente a procesos físicos (sedimentación y filtración). Por lo tanto, este no es un parámetro limitante en el diseño y dimensionamiento de humedales ya que es muy rápida, comparada con la remoción de materia orgánica.

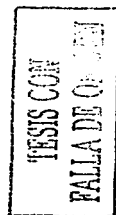
El nitrógeno puede estar presente en diferentes formas, siendo el amoniacal el más frecuente. La remoción de nitrógeno, es generalmente el parámetro limitante para el diseño, siendo aconsejable asumir que todo el nitrógeno que entra al sistema se convierte en amoniacal (EPA, 1988).

El fósforo está presente en las aguas residuales generalmente en concentraciones de 4 a 15 g/L, y su remoción puede ser de 30 al 60% dependiendo del caudal y de la carga hidráulica en el sistema (EPA, 1988).

Tabla 2.3 Mecanismos de remoción en humedales

Mecanismo	Sólidos suspendidos	Sólidos coloidales	DBO	N	P	Metales pesados	Organicos	Bacterias y virus	Descripción
Sedimentación	P	S	I	I	I	I	I	I	Deposito por gravedad
Filtración	S	S							Retención de partículas por obstrucción en el sustrato, raíces
Adsorción		S		P	P	S			Fuerzas atractivas entre partículas (superficie del sustrato y las plantas)
Precipitación química				P	P				Precipitación con compuestos insolubles
Descomposición						P		P	Reacciones químicas de oxidación y reducción
Metabolismo bacteriológico		P	P	P			P		Remoción de sólidos coloidales y orgánicos solubles por filtración en las plantas y nitrificación/desnitrificación bacteriológica
Metabolismo vegetal							S	S	Descomposición de material orgánico por foto reacciones
Adsorción en las plantas				S	S	S	S		Bajo las condiciones apropiadas cantidades significativas de este contaminante pueden adsorberse en la superficie de las plantas

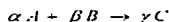
P = Efecto primario, S = Efecto secundario, I = efecto incrementado Fuente: EPA, 1988.



3. METODOLOGÍA

La velocidad de reacción es un término que se emplea para describir la rapidez de formación o desaparición de un producto químico o biológico. Aquellas reacciones que dependen del tiempo se conocen como reacciones cinéticas y, en el campo de la ingeniería ambiental son muchos los ejemplos de reacciones de este tipo: la degradación de materia orgánica en el agua, el crecimiento de masas biológicas, la desintegración radioactiva, la desinfección química, etcétera.

La cinética de reacción de los modelos utilizados en el diseño de humedales artificiales es función de la temperatura, presión y concentración de los reactivos. En forma general tenemos que los reactivos *A* y *B* reaccionan para producir *C*:



La velocidad de una reacción (cinética), se expresa en función de la constante *k* que normalmente depende de la temperatura (por convención se utiliza el signo “-” para la desaparición de una sustancia y el “+” para formación):

$$r_i = -k[A]^\alpha [B]^\beta = k[C]^\gamma$$

El *orden* de una reacción química se refiere a la suma de los exponentes de los reactivos ($\alpha + \beta$), de tal forma que las reacciones pueden ser:

$r_i = -k$	Reacción de orden cero
$r_i = -k[A]$	Reacción de primer orden
$r_i = -k[A]^2$	Reacción de segundo orden

El diseño de un humedal artificial se realiza a partir del cálculo de los tiempos necesarios para que se lleven a cabo las reacciones químicas y biológicas de interés.

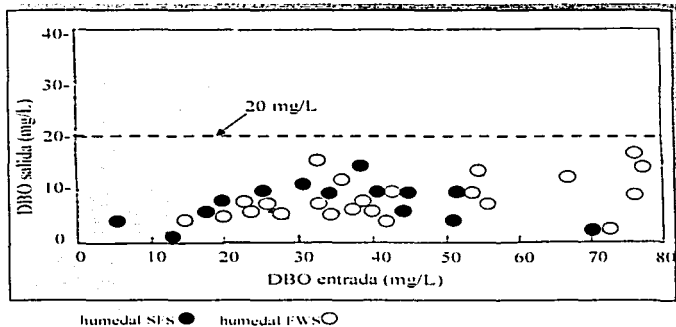
3.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Los principales parámetros de diseño de los humedales artificiales incluyen: el tiempo de retención hidráulica, la profundidad, el ancho y longitud de los estanques, la carga de materia orgánica (medida como DBO₅), la temperatura y la carga hidráulica.

En cuanto a la remoción de materia orgánica, los sistemas de humedales artificiales son considerados reactores biológicos y su rendimiento se estima mediante una cinética de primer orden, tanto para la variación de DBO₅, como para la remoción de nitrógeno.

La DBO expresa la cantidad de oxígeno, O₂, necesaria para biodegradar (degradación por microorganismos) la materia orgánica presente. En los sistemas de humedales, la remoción de materia orgánica sedimentable es rápida debido a las bajas velocidades que se manejan en los sistemas FWS, y a la deposición y filtración en los sistemas SFS. El resto de la materia orgánica es removida al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema, esta degradación ocurre de manera aerobia o anaerobia, dependiendo de la cantidad de oxígeno disponible. La remoción se lleva a cabo en forma aerobia cerca de la superficie del agua en los FWS y, cerca de las raíces y rizomas, en los SFS; pero en otras partes de estos sistemas la descomposición es anaerobia. En la figura 3.1 se muestra el comportamiento típico de la DBO para los dos sistemas de humedales artificiales, pudiendo observar que todos los valores del efluente están por debajo del nivel de referencia de 20 mg/L, independientemente del valor de entrada.

Figura 3.1 Comportamiento del DBO en humedales artificiales



Trabajo con
FALLA DE ORIGEN

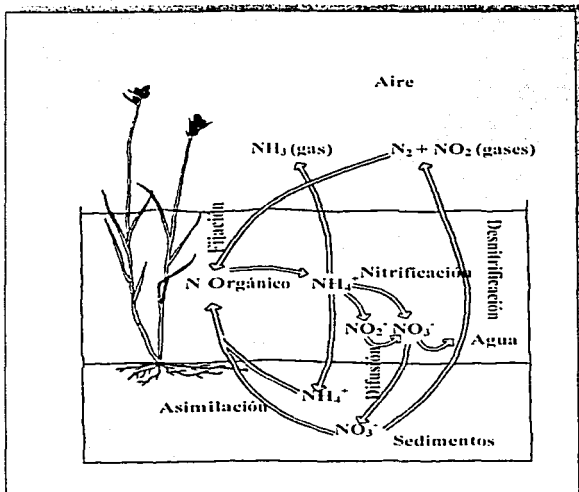
Fuente: EPA, 1988

En cuanto a la remoción de los sólidos suspendidos, es efectiva en humedales, y su comportamiento es muy similar al de la DBO, la concentración en los efluentes está siempre por debajo de 20 mg/L que es el valor de referencia, para el estudio de este proceso de remoción también es posible emplear un modelo de primer orden.

La remoción del nitrógeno ocurre por asimilación de las plantas, aunque solo en una pequeña fracción. El nitrógeno que entra en un humedal, asociado con materia particulada, sufre una descomposición o mineralización convirtiéndose en nitrógeno amoniacal. La mejor forma para remover el amoniaco en los humedales es la nitrificación biológica seguida por desnitrificación (EPA 1988), para esto debe existir suficiente oxígeno disponible, entre 4 y 6 g de oxígeno por cada gramo de nitrógeno amoniacal.

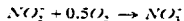
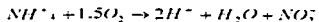
La figura 3.2 muestra los principales componentes del ciclo del nitrógeno en los humedales. Las formas inorgánicas más importantes del nitrógeno en los humedales son: el ión amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), nitritos (NO_2^-), óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno molecular disuelto (N_2). Además se encuentran presentes en el humedal compuestos orgánicos como la urea, aminoácidos, aminas y otros.

Figura 3.2 Ciclo del Nitrógeno en los humedales



Fuente: Kadlec y Knight, 1996.

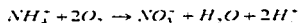
Como se puede observar en la figura, las diferentes formas presentes del nitrógeno en los humedales, se encuentran en una constante transformación de compuestos inorgánicos a orgánicos, siendo la nitrificación el principal mecanismo de transformación para reducir el nitrógeno amoniacal. La nitrificación se lleva a cabo en dos pasos:



Al sumar las dos reacciones anteriores, tenemos la expresión general para la nitrificación, de la cual se deduce, estequiométricamente, que se necesitan 4.6 g de oxígeno por cada gramo de ión amonio (NH_4^+). El oxígeno para la nitrificación es proporcionado por las raíces de la vegetación en el humedal y el oxígeno atmosférico

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

disuelto en el agua. Para propósitos de modelación, el proceso de transferencia de masa se modela como una reacción de primer orden:



Un diseño adecuado requiere de consideraciones hidráulicas y térmicas, además de la cinética de remoción.

Las condiciones de temperatura en el sistema pueden afectar a las actividades biológicas como la remoción de DBO, nitrificación y desnitrificación, es necesario estimar la temperatura del agua en el humedal para un uso correcto y efectivo de los modelos biológicos de diseño.

El procedimiento de diseño es usualmente iterativo: se asume la profundidad del agua y la temperatura, para resolver las ecuaciones cinéticas y determinar el área requerida por el humedal para la remoción de un contaminante; el contaminante que requiera la mayor área para su remoción, será el que limite el diseño estableciendo el tamaño del humedal.

Finalmente, se calcula la relación largo-ancho y la velocidad en el humedal, a partir de las ecuaciones hidráulicas.

3.2 ECUACIONES DE DISEÑO

La ecuación de primer orden para un reactor de flujo pistón, completamente mezclado,

es:

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_1 t} \quad (3.1)$$

en donde la constante de reacción, K_1 , es función de la temperatura y el tiempo de retención hidráulica que puede ser calculado con la expresión:

$$t = \frac{LW_2 n}{Q} \quad (3.2)$$

La porosidad, n , se considera homogénea y constante dentro del humedal, y es el volumen disponible para el flujo de agua (expresado como número decimal). El caudal que se emplea para estos cálculos, Q , es un valor medio entre la entrada, Q_e , y salida, Q_s , y se calcula como:

$$Q = \frac{Q_e + Q_s}{2} \quad (3.3)$$

A partir de las ecuaciones 3.1 y 3.2 se calcula el área superficial, A_s , del humedal. Esto es:

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{C_u}{C_s}\right)}{K_1 \cdot y_n} \quad (3.4)$$

La relación largo: ancho tiene gran influencia sobre el régimen hidráulico (se emplea 3:1 o 4:1). La resistencia al flujo en los sistemas FWS es debida a la vegetación y a la capa de sedimentos; y a las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los sistemas SFS. La mejor solución para contrarrestar la resistencia al flujo, es construir el fondo del humedal con suficiente inclinación para facilitar el drenaje, así como la utilización de múltiples celdas y la intercalación de zonas sin vegetación para permitir la redistribución del flujo.

Estimar la temperatura de un humedal puede ser muy complicado, los mecanismos térmicos involucrados incluyen conducción de o hacia el terreno, conducción de o hacia el agua, conducción y convección de o hacia la atmósfera y la radiación solar, el modelo simplificado que se utiliza para estimar la temperatura del sistema esta basado solamente en las pérdidas por conducción a la atmósfera, considerando este mecanismo como el mas importante en las pérdidas de energía en el sistema.

La energía ganada por el agua del sistema esta dado por:

$$q_u = C_p \alpha l \cdot y_n \quad (3.5)$$

El calor perdido por el sistema esta dado por:

$$q_l = (T_u - T_a) U \cdot l \cdot t \quad (3.6)$$

El valor de la temperatura ambiente T_a se obtiene de los registros meteorológicos.

El coeficiente de transferencia de calor se calcula con la siguiente expresión.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{y_1}{k_1}\right) + \left(\frac{y_2}{k_2}\right) + \left(\frac{y_3}{k_3}\right) + \left(\frac{y_4}{k_4}\right)} \quad (3.7)$$

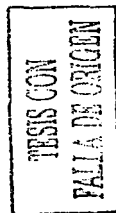
Donde $k_1 \dots k_n$ son las conductividad de las capas en el sistema, siendo $y_1 \dots y_n$ los espesores de dichas capas.

La siguiente tabla muestra valores de conductividad para los materiales presentes en un humedal.

Tabla 3.1 Conductividad térmica

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

Fuente: EPA, 1988.



Con las ecuaciones 3.5 y 3.6 se estima la diferencia de temperatura entre el ambiente y el humedal.

$$T_i = \frac{(U)A}{(C_p)(\rho)(y)(m)} (T_a - T_w) \quad (3.8)$$

Por lo tanto la temperatura del efluente será.

$$T_w = T_a - T_i \quad (3.9)$$

la temperatura promedio del agua en el humedal SFS será.

$$T_w = \frac{T_a + T_i}{2} \quad (3.10)$$

para el sistema FWS se utiliza la siguiente ecuación basada en la temperatura de formación del hielo T_m .

$$T_w = T_m + (T_a - T_m) \exp \left[\frac{-(U)A(L)}{(C_p)(\rho)(y)(C_p)} \right] \quad (3.11)$$

3.2.1 SISTEMAS FWS

Tiempo de retención hidráulica. Para estos sistemas el tiempo de retención necesario para la eliminación de la DBO₅, se puede estimar empleando el siguiente modelo cinético.

$$C_e = C_{0e} \cdot e^{-k_d \cdot A_e \cdot t} \quad (3.12)$$

en donde A_e es un coeficiente empírico que representa la fracción de DBO₅ no eliminada por la sedimentación a la entrada del sistema, y A_e es la superficie específica de actividad microbiológica en m²/m³. Los valores recomendados para la ecuación 3.5 son (Metcalf y Eddy, 1996):

$$\begin{aligned} A_e &= 0.52 \\ k_d &= 0.0057(1.1)^{T-20} \\ A_e &= 15.7 \text{ m}^2/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Longitud del humedal. Para calcular la longitud, se emplea la ecuación de Manning para flujo en canales abiertos a presión atmosférica, la cual establece que la velocidad del flujo, v , depende de la profundidad del agua, y , la pendiente, s , y el coeficiente de Manning, M :

$$v = \frac{1}{M} y^{1.48} s^{0.48} \quad (3.14)$$

El coeficiente M es a su vez una función del factor de resistencia, a , que depende de la vegetación y profundidad del humedal (ver tabla 3.1):

$$M = \frac{a}{y^{1.48}} \quad (3.15)$$

Tabla 3.2 Factor de resistencia de Manning

a	Densidad de vegetación y profundidad
0.4	Vegetación escasa, $y < 0.4$ m
1.6	Vegetación moderadamente densa, $y \leq 0.5$ m
6.4	Vegetación muy densa y capa de residuos, $y < 0.5$ m

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996

Al combinar las ecuaciones 3.13 y 3.14 se obtiene:

$$v = \frac{1}{a} y^{1.48} s^{0.48} \quad (3.16)$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

en donde se pueden introducir las siguientes relaciones geométricas: $v=Q/W$; $W=A$, L y $s=mv/L$, obteniendo la siguiente expresión para la longitud del humedal:

$$L = \left[\frac{A \cdot v^2 \cdot m^2 \cdot 86400}{\alpha Q} \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

Esta expresión, permite calcular la longitud máxima para una celda del humedal compatible con el gradiente hidráulico, m , seleccionado. El valor de m , comúnmente usado, se encuentra entre 10 y 30% (EPA, 1988).

Remoción de nitrógeno. El modelo de diseño recomendado, asume que la remoción de amoníaco ocurre principalmente por nitrificación, mediante reacciones similares a las observadas en filtros percoladores y biodiscos (ecuaciones 3.1 a 3.4), con las siguientes constantes de equilibrio:

$$K_1 = 0 \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \quad (3.18)$$

$$K_1 = 0.1367(1.15)^{T-10} \quad \text{para temperaturas } 1-10^\circ\text{C} \quad (3.19)$$

$$K_1 = 0.2187(1.048)^{T-20} \quad \text{para temperaturas mayores a } 10^\circ\text{C} \quad (3.20)$$

Cuando la remoción por nitrificación no satisface el valor de descarga establecido para el nitrógeno total, NT , es necesario evaluar la remoción por desnitrificación. La desnitrificación se puede calcular a partir de las ecuaciones anteriores, empleando el siguiente valor para la constante de equilibrio:

$$K_1 = 1.00(1.15)^{T-20} \quad (3.21)$$

El nitrógeno total en el efluente es la suma del nitrógeno remanente de la nitrificación y desnitrificación. La determinación del área requerida para alcanzar el nivel de NT específico, es un procedimiento iterativo usando las ecuaciones 3.1 a 3.4 aplicadas a la nitrificación y desnitrificación.

3.2.2 SISTEMAS SFS

Para el diseño de los sistemas SFS, se emplea la ecuación 3.2 para el tiempo de retención, en donde la porosidad, n , varía con el tipo de relleno utilizado (ver tabla 3.2).

Tabla 3.3 Características típicas de los medios para humedales SFS

Tipo de material	Tamaño efectivo D (mm)	Porosidad n	Conductividad hidráulica, k , ($m^3/m^2/d$)	K_{20}
Arena media	1	0.42	420	1.84
Arena gruesa	2	0.39	480	1.55
Arena gravosa	8	0.35	500	0.86

Fuente EPA 1988.

En esencia, los mecanismos de remoción de los sistemas SFS son los mismos que los descritos para los sistemas FWS, aunque el rendimiento de los sistemas SFS puede ser mayor, ya que el área sumergida es mayor, lo cual aumenta el crecimiento de la biomasa fija y, por tanto, la remoción de materia orgánica.

La constante K_1 en estos sistemas se calcula con la siguiente ecuación:

$$K_1 = K_{20}(1.1)^{T-20} \quad (3.22)$$

para el dimensionamiento del sistema se calcula el área transversal, A_c , de acuerdo a la ley de Darcy:

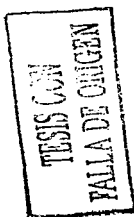
$$A_c = \frac{Q}{k_s * S} \quad (3.23)$$

en donde Q es el flujo a través del sistema, k_s es la conductividad hidráulica del medio y S es la pendiente en fracción decimal. Para estimar la conductividad hidráulica cuando se usan gravas gruesas o roca, es posible utilizar la ecuación de Ergun:

$$k_s = n^{3.7} \quad (3.24)$$

A partir del valor de área transversal, se calcula el ancho del sistema con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{A_c}{y} \quad (3.25)$$



y el área superficial A_s , con la ecuación 3.4 para finalmente estimar la longitud del humedal a partir de la relación geométrica:

$$L = \frac{A_s}{H} \quad (3.26)$$

Para estimar la remoción de nitrógeno, es necesario tomar en cuenta la cantidad de oxígeno transferido a la zona de las raíces, el cual es considerado entre 5 a 45 $\text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$. La constante K_{NH} para la nitrificación en estos humedales es:

$$K_f = K_{NH}(1.15)^{T-10} \quad \text{para temperaturas } 1-10^\circ\text{C} \quad (3.27)$$

$$K_f = K_{NH}(1.048)^{T-20} \quad \text{para temperaturas mayores a } 10^\circ\text{C} \quad (3.28)$$

en donde K_{NH} es función de la fracción del lecho del humedal ocupado por las raíces (profundidad de penetración, r_z):

$$K_{NH} = 0.01854 + 0.3922(r_z)^{2.077} \quad (3.29)$$

El valor de K_{NH} se considera igual a 0.4007 para raíces totalmente desarrolladas y 0.01854 cuando el lecho no tiene vegetación.

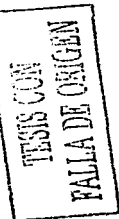
El área para la nitrificación y desnitrificación, necesaria para alcanzar el valor requerido de nitrógeno total, NT, se calcula de la misma manera descrita para los sistemas FWS.

Las ecuaciones presentadas anteriormente se tomaron de Melcañ y Eddy (1996) y, aunque de uso muy extendido se recomienda tener cautela al aplicarlas, ya que las constantes fueron derivadas a partir de datos de funcionamiento de un número limitado de sistemas. La tabla 3.3 indica los intervalos de valores para los principales parámetros de diseño de humedales artificiales, deberá recurrirse a ésta para comprobar que un diseño propuesto cumpla con los valores mínimos que garantizan su funcionamiento.

Tabla 3.4 Valores indicativos para el diseño de humedales artificiales

Parámetro de diseño	Unidad	Tipo de sistema	
		FWS	SFS
Tiempo de detención hidráulica	día	4-15	4-15
Profundidad del agua	m	0.1-0.6	0.3-0.75
Carga de DBO	kg ha·d	67	67
Carga hidráulica	$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$	0.014-0.046	0.014-0.046

Fuente: Melcañ y Eddy, 1996



Las características que deben tenerse en cuenta para el diseño de humedales artificiales, incluyen: topografía, características del suelo, riesgo de inundación y clima. El terreno idóneo para la instalación de un humedal artificial es uno de topografía uniforme horizontal o en ligera pendiente, ya que la construcción de depósitos en terrenos con topografías irregulares aumenta el costo de construcción (se recomiendan terrenos con pendientes menores al 5 %).

En ambos sistemas se deben minimizar las pérdidas por percolación a través de la superficie del terreno, reduciendo artificialmente la permeabilidad mediante la compactación del terreno o la construcción de pequeños sistemas revestidos con arcilla, concretos o lámina impermeable.

Se debe considerar el clima como un criterio de diseño, quizás el más importante, ya que el rendimiento del proceso es muy sensible a la temperatura por tratarse principalmente de procesos biológicos.

En el siguiente capítulo se aplica la metodología expuesta anteriormente en un caso particular de asentamientos irregulares en la ZMICM.

4. CASO DE APLICACIÓN

La dinámica poblacional del área metropolitana se genera en un 55% por su propio crecimiento natural y en un 45% por migración. La tasa de crecimiento, aunque con tendencias decrecientes, resulta abrumadora: 400 000 habitantes por año.

Es por esto, y por razones económicas, que la gente se ha visto en la necesidad de ocupar terrenos en los alrededores de la zona urbana, formando asentamientos irregulares no planeados con casas y servicios autoconstruidos que generan graves problemas, entre los que se encuentra el deterioro ambiental por la ausencia de infraestructura de servicios públicos o por la baja calidad de los mismos.

En forma promedio, la cobertura de alcantarillado a nivel nacional beneficia a 50 de cada 100 habitantes; en el medio urbano alcanza el 65%, pero en el medio rural apenas 12 de cada 100 personas cuentan con este servicio (Schteingart, 1991).

A continuación se presenta la ubicación, características generales, servicios instalados, consumo y disposición actual de agua de dos asentamientos irregulares de la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), para, a partir de estos datos, analizar la posible aplicación de humedales artificiales como método de tratamiento de sus aguas residuales; y, en el capítulo siguiente presentar el diseño de los mismos.

4.1 CARACTERÍSTICAS DEL SITIO DE ESTUDIO

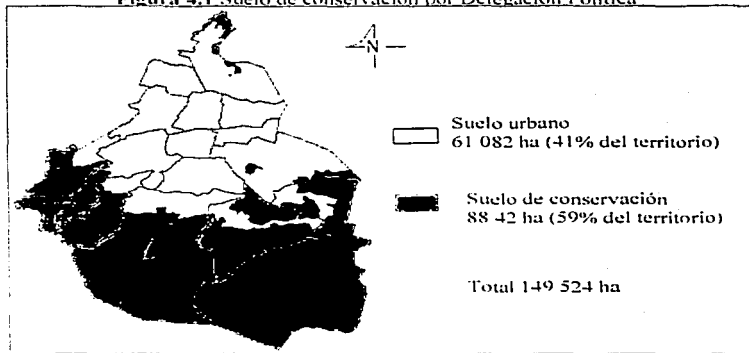
El Distrito Federal limita al norte, este y oeste con el Estado de México y al sur con Morelos y su suelo se divide en urbano y de conservación, dependiendo de los usos productivos y las actividades de la población. La superficie del suelo de conservación es de 88,442 ha, misma que constituye poco más del 59 % de la superficie total del Distrito Federal y esta compuesta principalmente por el área rural de la región sur y surponiente: en las delegaciones de Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco, y una pequeña área al norte de la Ciudad de México, en la delegación Gustavo A. Madero. En junio del 2000, además de 35 poblados rurales, se

tenían registrados en suelo de conservación 708 asentamientos humanos: 180 regulares y 528 irregulares (figura 4.1).

La Delegación de Tlalpan, ubicada al sur del Distrito Federal (figura 4.2), se ha constituido como uno de los destinos preferidos para los flujos migratorios que arriban a la Ciudad de México, sobrepasando las zonas planeadas de desarrollo urbano y dando como resultado el surgimiento de numerosos asentamientos irregulares; en su gran mayoría localizados sobre suelos de conservación ecológica, áreas boscosas o zonas de recarga acuífera, amenazando con ello la sustentabilidad de la región.

Como parte de las acciones de política ambiental, en abril del 2000, la Asamblea Legislativa del Distrito Federal (ALDF) aprobó el Programa General de Ordenamiento Ecológico. Ante esta situación, los esfuerzos de las autoridades se han enfocado a la planeación, programación y regulación territorial, mediante la elaboración de Programas Parciales de Desarrollo Urbano, que reglamentan los usos del suelo para controlar el crecimiento en dichas poblaciones y minimizar los impactos negativos al ambiente.

Figura 4.1 Suelo de conservación por Delegación Política



Fuente: INEGI, 2000

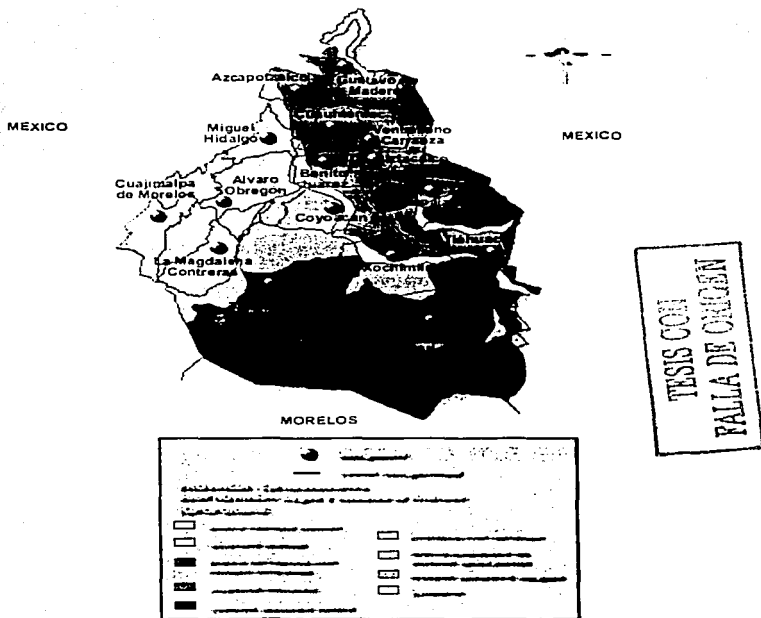
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En ese contexto, se encuentra el *Programa de Manejo Integral de Contaminantes* (PMIC), inscrito en el Programa Parcial de Desarrollo Urbano de la región denominada *San Miguel Topilejo*, el cual tiene como objeto proponer las estrategias necesarias en materia de agua potable, agua residual, contaminación atmosférica, manejo de residuos sólidos, manejo de residuos peligrosos y prevención de riesgo ambiental, que permitan la regularización de los asentamientos de la zona, atendiendo en todo momento a la minimización de los impactos ambientales. Esta tesis forma parte del PMIC y sus conclusiones fueron presentadas como parte del *Plan de acción para la regularización de San Miguel Topilejo*. Los datos necesarios para la elaboración de este capítulo fueron tomados del informe final del proyecto PMIC-Topilejo (Aguirre et al, 2002).

San Miguel Topilejo está ubicado al sureste del valle de México entre los kilómetros 28 y 33 de la autopista México-Cuernavaca. Al norte limita con los poblados de San Mateo Nalpa y Santiago Tecalpatlalpan, pertenecientes a la delegación Xochimilco; al sur con Tres Marías y Coajomuleo, Morelos; al este con San Francisco Tlalnepantla, Xochimilco y la sierra Chichinautzín y al oeste con la Exhacienda del Fraile y el Ajusco; su superficie total es de 10,365.28 hectáreas (figura 4.3).

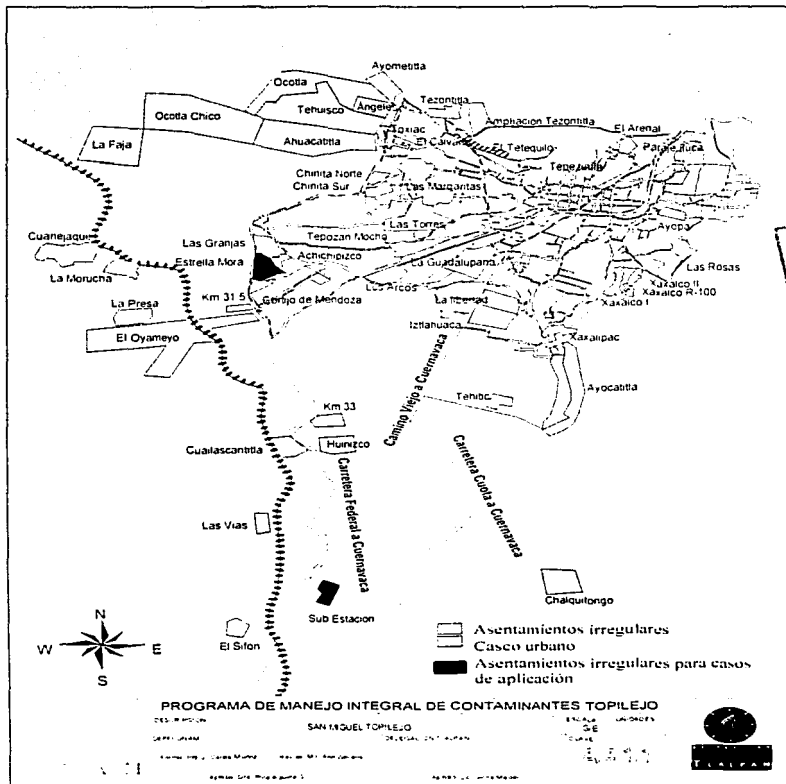
En San Miguel Topilejo existen 52 asentamientos irregulares conformados por un total de 5000 lotes, de los cuales el 56.3% son lotes habitados, el 9.7% son terrenos baldíos y el 5.7% tienen algún tipo de construcción, pero están deshabitados. Estos asentamientos presentan características muy diversas, que se asocian a su génesis y a las particularidades topográficas y geológicas de los sitios en donde se asientan.

Figura 4.2 Delegaciones del Distrito Federal



Fuente: INEGI, 2000.

Figura 4.3 San Miguel Topilejo



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De acuerdo con su origen, los asentamientos irregulares ubicados en Topilejo se pueden aglutinar en tres grandes grupos: los que han surgido en las inmediaciones del casco urbano producto del crecimiento natural no controlado; los que se originaron en los alrededores de puntos característicos de la región, como es el caso de Subestación eléctrica (7 Ocotes) y La Presa; y los que han sido el resultado de invasiones o de la expansión de algunos grupos de ejidatarios, los cuales se encuentran dispersos a lo largo de la interfase entre los dos primeros grupos.

Estas comunidades también se pueden caracterizar, como se ha mencionado, con base en las peculiaridades topográficas y geológicas, pudiendo observar dos conjuntos de comunidades: las que se encuentran asentadas en sitios de relativamente fácil acceso, sobre suelo blando o arcilloso, como Las Vías y Km 31.5; y las que se ubican sobre suelo rocoso, de difícil acceso o en pendientes pronunciadas, como pueden ser El Tetequilo, Chalquítongo y Las Bombas.

En los asentamientos de *San Miguel Topilejo* se presenta una amplia gama de clases sociales, que abarcan desde las comunidades que subsisten en condiciones de extrema pobreza, hasta las que habitan fincas de descanso o de fin de semana. Algunos de estos asentamientos se consideran consolidables, ya que cuentan con construcciones definitivas, presentan un alto grado de organización, tienen una antigüedad relevante, no se ubican en zonas de riesgo y son susceptibles de adoptar programas ambientales que permitan asegurar la sustentabilidad del sitio donde se ubican.

4.1.1 SITUACIÓN AMBIENTAL

Para establecer la situación ambiental de *San Miguel Topilejo*, se realizó un diagnóstico de la zona en materia de manejo de agua potable, agua residual, contaminación atmosférica, residuos sólidos y peligrosos y riesgo ambiental, empleando datos recabados de fuentes bibliográficas, visitas al sitio y levantamiento de encuestas. Sin embargo, a partir de esta sección y considerando los objetivos de esta tesis, solo se hará referencia a la información correspondiente a la generación, manejo y disposición de agua residual.

Los servicios básicos proporcionados a las poblaciones de *San Miguel Topilejo* son precarios: el agua se obtiene principalmente a través de pipas y en casi todos los asentamientos se utilizan para su disposición fosas sépticas mal construidas.

En Topilejo se distinguen cinco fuentes de abastecimiento, las cuales se listan a continuación de acuerdo con su importancia:

- carros tanque.
- red de distribución de agua potable del casco urbano.
- agua de lluvia.
- manantiales naturales y, finalmente,
- pozos someros excavados por los propios habitantes.

Al menos el 95% de los habitantes obtienen el líquido mediante carros tanque, complementando su dotación mediante el aprovechamiento de manantiales, agua de lluvia o pozos. Más del 61% de los habitantes afirma contar con algún aditamento para captar el agua de lluvia.

Aproximadamente un 40% de la población manifestó, que el agua potable que utiliza para su consumo tiene una apariencia turbia, 10% mencionó que el agua tenía coloración, 6% que contiene sólidos y solo un 32% considera que la calidad del agua recibida es aceptable.

Toda la población almacena el agua, ya sea en tinacos, cisternas o tambos, porque no cuentan con un sistema regular de abastecimiento. En los asentamientos de *San Miguel Topilejo*, el 20 % de la población almacena el agua para consumo en tambos y el 80 % utiliza cisternas y/o tinacos (figura 4.4).

El uso de agua en la zona es predominantemente doméstico. De acuerdo con la información recabada durante las visitas de campo, se estima que el consumo promedio oscila entre 38.2 y 51.7 L/hab-día, dotación que, en el mejor de los casos, se encuentra en el límite inferior recomendado por la Organización Mundial de la Salud para preservar condiciones de salubridad (50 L/hab-día).

Figura 4.4 Sistemas de almacenamiento



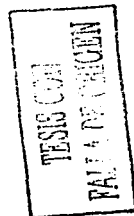
TESIS CON
FALLA DE COPIAR

En cuanto a la forma de consumo, se puede mencionar que cuando menos el 30% de la población encuestada hierve el agua para beber, el 19,2% la bebe directamente y el 39% consume agua de garrafón.

Además de los problemas de salud asociados con el suministro y almacenamiento de agua potable, existen otros derivados de la falta de alcantarillado (figura 4.5). El 41% de los encuestados manifestó que las aguas residuales producidas en su vivienda se disponían en fosas sépticas, hoyos negros o letrinas, el 8% la dispone en grietas o barrancas y el 13% en letrinas. Además, cabe hacer notar que la mayoría de las personas que poseen fosas sépticas no cuentan con los conocimientos, ni dispositivos, necesarios para darles el mantenimiento requerido.

habitantes (figura 4.6). La incidencia de enfermedades gastrointestinales y respiratorias es considerable (alrededor de un 24% de los encuestados dijo padecerlas frecuentemente).

Figura 4.6 Descargas de agua residual a la vía pública



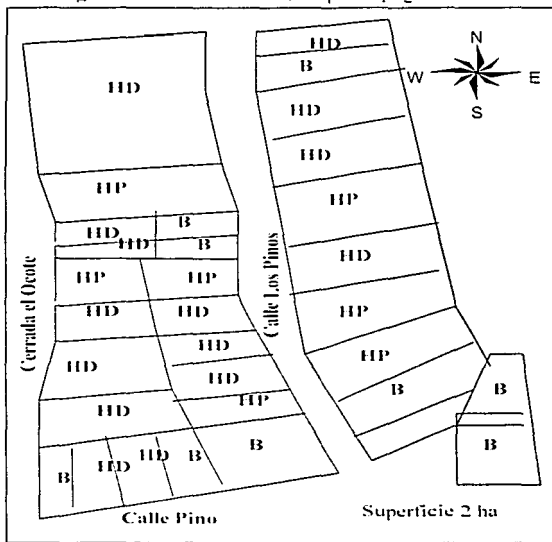
Desafortunadamente en la zona, el agua de lluvia arrastra los contaminantes presentes en el suelo (partículas erosionadas, basura y residuos fecales producto del gran número de animales callejeros), contribuyendo así a incrementar aún más la contaminación de acuíferos.

4.1.2 ASENTAMIENTOS IRREGULARES DE ESTUDIO

Para propósitos de esta tesis, se seleccionaron dos asentamientos de *San Miguel Topilejo*: Estrella Mora y Subestación Eléctrica, que reúnen las características para la posible implantación de humedales artificiales. Estas características son: no contar con red formal de drenaje, estar alejados de la misma, sistemas actuales de disposición de agua residual mal diseñados o mal construidos y servicio de agua potable informal (pipas).

Estrella Mora. Se encuentra en la parte noroeste de Topilejo. (ver figura 4.3), tiene 33 lotes y una superficie de 2 ha, cuenta con una población de 25 habitantes, pertenecientes a 16 familias (figura 4.7), las cuales cuentan con servicio informal de agua potable (pipas) y sistemas de disposición de aguas residuales mal construidos, sus viviendas son del tipo popular y tienen servicio de energía eléctrica informal.

Figura 4.7 Estrella Mora (croquis topográfico)



ESTRELLA MORA
CALLE DE CALZADA

HD: Habitación definitiva, HP: Habitación provisional, B: Baldío
Fuente: Iralpán 2002

Subestación Eléctrica. Está ubicada en la parte sur de Topilejo (figura 4.5), integrada por 35 lotes, 20 familias, un total de 74 habitantes y una superficie de 1.2 ha (figura 4.8). Los sistemas para la disposición de las aguas residuales fueron construidos por ellos mismos.

presentando mal funcionamiento, el servicio de energía eléctrica es informal y sus viviendas son de tipo popular.

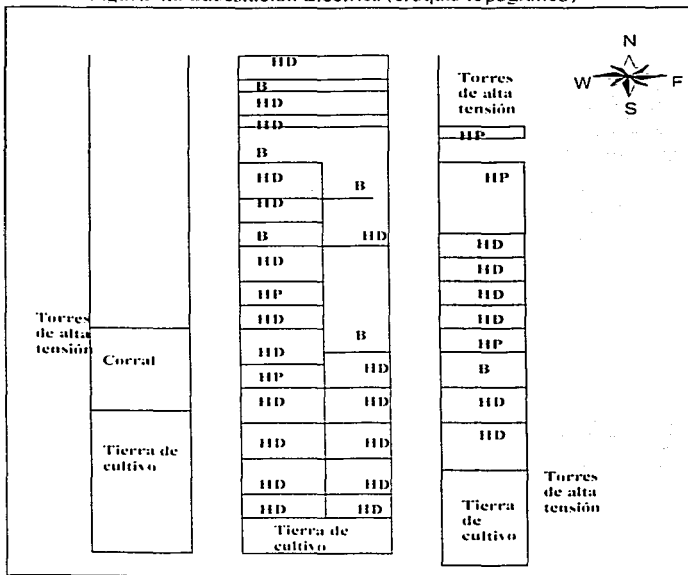
4.1.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Las directrices a seguir en asentamientos irregulares para el manejo de agua residuales (reducción de volumen generado, tratamiento y disposición), deben estar encaminadas a disminuir la carga contaminante emitida al subsuelo y fomentar el reuso.

Para disminuir los contaminantes al subsuelo existen varias alternativas:

- de aplicación colectiva: sistema de alcantarillado conectado a la red municipal, plantas locales de tratamiento y humedales artificiales colectivos, y
- de aplicación individual: fosas sépticas, baños secos y humedales artificiales.

Figura 4.8 Subestación Eléctrica (croquis topográfico)



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Las alternativas de aplicación colectiva son las soluciones más deseables para cualquier tipo de asentamiento, pero en el caso de estudio resultan soluciones muy costosas y aplicables solo a largo plazo.

Sistema de drenaje. La construcción de un sistema de drenaje convencional posibilita el adecuado control de las descargas domiciliarias y su conducción hacia algún sistema de tratamiento o conexión con una red de alcantarillado. Sin embargo, su construcción en los asentamientos irregulares de *San Miguel Topilejo* resulta muy costosa, si se considera que estos se encuentran alejados entre sí y de la red de drenaje municipal, además del tipo de suelo y pendientes de la zona.

Planta para tratamiento de aguas residuales. Una planta de tratamiento requeriría de la construcción de un sistema local de drenaje, personal calificado para su operación, además de que los lodos producidos tendrían que ser acondicionados o tratados para su eliminación.

Considerando el costo de construcción del sistema de alcantarillado, la instalación de una planta de tratamiento sería aún más elevado y, por el momento, fuera del alcance de los asentamientos de la zona de estudio.

Al igual que las fosas sépticas, los humedales son recomendables para el tratamiento y disposición de aguas residuales en sitios donde sea costosa la construcción de un sistema de alcantarillado, como es el caso de los asentamientos de *San Miguel Topilejo*. En el capítulo 2 se presentaron las características generales de las fosas sépticas, junto con los baños secos, presentándose a continuación el diseño de humedales artificiales.

4.2 DISEÑO DE HUMEDALES

Como se mencionó anteriormente, estos sistemas se han utilizado con éxito en los últimos 30 años en diversas partes del mundo: el método aprovecha especies vegetales, cultivadas en un medio acuático o semi-acuático, para realizar las funciones de asimilación y acumulación de contaminantes, transfiriendo oxígeno hacia la zona de las raíces y proporcionando el sustrato para la actividad microbiana. Pueden remover hasta 80% de materia orgánica, servir como tratamiento para prevenir la contaminación de los abastecimientos de agua potable, además de fomentar el reuso del agua.

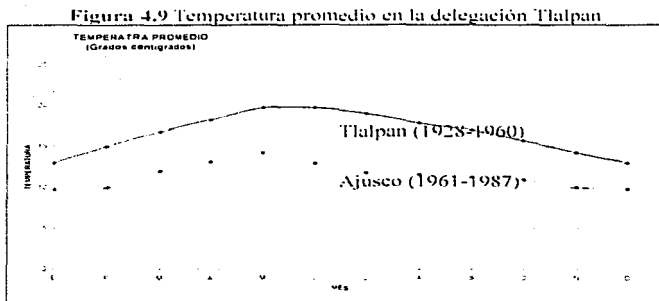
Considerando el diagnóstico correspondiente a la distribución, disposición y uso del agua en los asentamientos de *San Miguel Topilejo*, el diseño de humedales estará enfocado principalmente al tratamiento de las aguas residuales para su reutilización, aumentando así la dotación de agua a un valor cercano a lo recomendado por las normas mexicanas de abastecimiento de agua potable, y reducir la carga contaminante dispuesta al subsuelo (Aguirre et al. 2002).

Para el diseño y evaluación de los humedales propuestos se empleará como dato de diseño una población de seis habitantes por casa habitación, además de ser necesario establecer:

- temperatura de operación,
- consumo de agua,
- descarga de aguas residuales y
- características del humedal.

Temperatura de operación. Para iniciar el diseño de los humedales es indispensable conocer la temperatura de la zona. En la delegación Tlalpan se cuenta con dos estaciones meteorológicas, Tlalpan y Ajuseco, las cuales reportan temperaturas que oscilan entre 10 y 20 °C (figura 4.9). La temperatura promedio para Tlalpan, entre 1928 y 1960, reportada por la CNA (Comisión nacional del agua), es de 16.4 °C, con temperaturas medias de 14.2 y 19.7°C para el año mas frío y caluroso respectivamente, y para la estación del Ajuseco, en el período de 1961 a 1987, la temperatura promedio fue de 11.4°C, con 10.5 y 13°C para el

año más frío y caluroso respectivamente. Además de la temperatura media de la zona, es necesario considerar la temperatura mínima extrema de la misma (tabla 4.1).



Fuente: CNA registro mensual de temperatura media en °C.

Tabla 4.1 Temperaturas extremas y número de días de ocurrencia (1987)

Mes	Máxima (°C)	Días(s)	Mínima (°C)	Día(s)
Enero	19.0	3	1.0	2
Febrero	20.0	2	0.0	3
Marzo	23.0	1	0.0	3
Abril	21.0	1	3.0	1
Mayo	21.0	1	3.0	2
Junio	20.0	1	4.0	1
Julio	19.0	1	6.0	1
Agosto	19.5	1	6.0	9
Septiembre	19.5	1	5.0	3
Octubre	18.0	2	2.0	6
Noviembre	18.0	3	1.0	1
Diciembre	20.0	1	3.0	3

Consumo de agua. El manual de diseño de CNA establece que, en caso de no disponer de histogramas o de registros de consumo de agua, se podrán considerar los valores de consumo doméstico de la tabla 4.2, obtenidos del *Estudio de actualización de dotaciones en el país*, efectuado por la propia CNA para varias ciudades de la República Mexicana, durante los años de 1992 y 1993 (CNA, 2000).

Tabla 4.2 Consumo doméstico per cápita

Clima	Consumo por clase socioeconómica (L/hab-día)		
	Residencial	Media	Popular
Cálido	400	230	185
Semicaldo	300	205	130
Templado	250	195	100

- 1) Para los casos de climas semitropicales se consideran los mismos valores que para el clima templado.
 2) El clima se selecciona en función de la temperatura media anual: Cálido (mayor de 22 C.), Semicaldo (18 - 22 C.), templado (12 - 17.9 C.), semifrio (5 - 11.9 C.) y frío (menor de 5 C.).

Tomando en cuenta las temperaturas promedio reportadas por las estaciones meteorológicas de Ialpan y Ajusto (clima templado), y como clase socioeconómica la popular, el consumo de agua para fines de diseño será de **100 L/hab-día**.

Descarga de aguas residuales. Considerando el consumo de 100 L/hab-día y, basado en el manual de CNA arriba mencionado, se considera que el 75% de la dotación de agua se convertirá en agua residual (75 L/hab-día), que al multiplicar por el número de habitantes promedio por predio, produce un efluente de **450 L/día** como gasto de diseño.

Para la estimación de la carga contaminante en aguas residuales se empleo como base la información de la tabla 4.3 para zonas urbanas propuesta por Metcalf y Eddy (1996) y los valores de la tabla 4.4, propuestos por Henry y Heinke (1999).

Para propósitos de diseño se empleará como valor de la concentración de materia orgánica, medida como DBO₅, **220 mg/L**, por ser el valor medio recomendado por Metcalf y Eddy, y ser ligeramente superior al de poblaciones pequeñas dado por Henry y Heinke. Y, la concentración de materia orgánica en el efluente deberá ser igual o menor a 20 mg/L, de acuerdo con lo establecido en la normatividad mexicana (NOM-003-ECOL-1997).

Características del humedal. Además de las características del sitio de instalación, es necesario establecer algunas características generales para el diseño del humedal (FWS o SFS). Estas son:

- Utilización de arena media, tamaño máximo de grano (10%) de 2 mm, porosidad de 0.39 y conductividad hidráulica de 480 m³/m²-día (Metcalf y Eddy, 1991).
- Tipo de vegetación empleada, carrizo.

- Profundidad del tanque de 60 cm. de acuerdo al largo de las raíces de las plantas propuestas (Metcalf y Eddy, 1991).
- Zona de raíces de 65%, considerando la penetración del carrizo y la profundidad del humedal.

A continuación se presenta el cálculo de los dos tipos de humedales, FWS y SFS, siguiendo los pasos mencionados en la metodología del capítulo tres y los datos de diseño seleccionados.

Tabla 4.3 Composición típica del agua residual doméstica (mg/L)

Contaminantes	Concentración		
	Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	350	720	1200
Disolubles, totales (SDT)	250	500	850
Fijos	145	300	525
Volátiles	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	100	220	350
Fijos	20	55	75
Volátiles	80	165	275
Sólidos sedimentables	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅ , 20 °C)	110	220	400
Carbono orgánico total (COT)	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	250	500	1000
Nitrogeno (total en la forma N _T)	20	40	85
Orgánico	8	15	35
Amoníaco libre	12	25	50
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo (total en la forma de P)	4	8	15
Orgánico	1	3	5
Inorgánico	3	5	10
Cloruro	30	50	100
Sulfato	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	50	100	200
Grasa	50	100	150
Coliformes fecales (NMP) ¹	10 - 10	10 - 10 ⁵	10 - 10 ⁷
Compuestos orgánicos volátiles (µg/l)	100	100-400	> 400

¹ = número de coliformes en 100 ml
Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

TESIS CON
 PALLA DE ORIGEN

Tabla 4.4 Composición típica del agua residual domestica (mg/L)

Tipo de agua residual	POBLACION		
	Pequeña	Mediana	Grande
Coliformes fecales (NMP)	100	80	70
DBO ₅	190	240	300
DQO	320	400	500
COT	135	170	215
Sólidos en suspensión	225	300	350
Sólidos disueltos	450	600	700
N total	40	30	25
P total	10	8	7
pH	7	7	7
Cobre	0.14	0.17	0.27
Cadmio	0.003	0.010	0.016
Cromo	0.04	0.08	0.16
Níquel	0.01	0.06	0.11
Plomo	0.05	0.1	0.2
Zinc	0.19	0.29	0.38

El número de coliformes en 100 ml
Fuente: Henry y Henke, 1999

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

4.2.1 HUMEDAL FWS

Como ya se mencionó, el diseño de los sistemas es un proceso iterativo, primero se determina la superficie necesaria para la remoción de los contaminantes de interés y el que requiera mayor área se considera el contaminante crítico. Posteriormente, se comprueba que el sistema cumpla con el diseño hidráulico y que la temperatura del humedal, T_w , se aproxime a la temperatura promedio de la zona.

Remoción de materia orgánica. Se calcula la constante K_T a partir de la ecuación 3.13, en función de la temperatura promedio en invierno, 9°C (se emplea la temperatura más baja por corresponder a una mayor área superficial):

$$K_T = (0.0057d^{-1})(1.1)^{20-9} = 0.00199d^{-1}$$

Posteriormente se calcula el área superficial y el tiempo de retención hidráulico, empleando un valor de n igual a 0.65, y las ecuaciones (3.4) y (3.2):

$$A_s = \frac{-\left(0.45 \frac{m^3}{d}\right) \ln\left(\frac{20}{(220)(0.52)}\right)}{(0.7)(0.00199d^{-1})(15.7)^{1.486}(0.6m)(0.65)} = 11.62m^2$$

$$t = \frac{(11.62m^2)(0.6m)(0.65)}{0.45 \frac{m^3}{d}} = 10.07d$$

El área superficial se tomará $12m^2$. Para el verano, como la temperatura promedio es mayor, el área superficial necesaria es menor ($A_s = 4.1m^2$), por lo que el diseño se hará para el invierno. Para una mejor distribución de flujo, se dividirá el área en tres celdas iguales:

$$A_c = \frac{12m^2}{3} = 4m^2$$

El ancho de la celda se determina a partir de la relación de diseño 3:1 (L:W):

$$LW' = (3W')(W') = 3W'^2 = 4m^2$$

$$W' = 1.16m$$

$$L = 3 * 1.16m = 3.5m$$

Para una vegetación muy densa y la capa de residuos, se asume un factor de resistencia de Manning, n , igual a 6.4 (tabla 3.1) y un gradiente hidráulico m de 15%. Con estos valores se determina la profundidad del agua en la celda con la ecuación (3.4):

$$A_c = \frac{-\left(0.15 \frac{m^3}{d}\right) \ln\left(\frac{20}{(220)(0.52)}\right)}{(0.7)(0.00199d^{-1})(15.7)^{1.48}(y)(0.65)} = 4m^2$$

$$y = 0.58m \approx 0.6m$$

Y a partir de estos valores se calcula la longitud máxima del humedal, de acuerdo con la ecuación (3.17).

$$L = \left[\frac{(7)(0.6)^{1.48} (0.15)^{1.48} * 86400}{(6.4)(0.15)} \right]^{1/2} = 1574.7m$$

Esta es la longitud máxima de la celda compatible con el gradiente hidráulico, por lo tanto los valores calculados, $L=3.5m$, son correctos. Posteriormente, se recalcula el tiempo de retención:

$$t = \frac{(4m^2)(0.6m)(0.65)}{0.15 \frac{m^2}{d}} = 10.4d$$

y la velocidad del sistema.

$$v = \frac{3.5m}{(10.4d)86400 \frac{s}{d}} = 3.89 * 10^{-6} \frac{m}{s}$$

El coeficiente de transferencia de calor, U , y la temperatura en invierno a la salida del humedal, con una temperatura extrema de $3^{\circ}C$ y una capa de sustrato de 15 cm, se calculan con las ecuaciones (3.7) y (3.11), respectivamente:

$$U = \frac{1}{\frac{0.15}{0.05} + \frac{0.6}{0.58}} = 0.2478$$

$$T_w = 9 + (11.4 - 9) \exp\left[\frac{-(0.2478)(3.5)}{(0.15)(0.6)(3.89 * 10^{-6})(4215)}\right] = 9^{\circ}C$$

Finalmente, ya que la temperatura a la salida del humedal, $9^{\circ}C$, se aproxima a la temperatura promedio ($11.4^{\circ}C$), y además está por encima de la temperatura de congelación que reporta la bibliografía ($3^{\circ}C$), se concluye el proceso iterativo.

Remoción de Nitrógeno. Considerando los datos de la tabla 2.1 ($0.8g/L$ de NH_4 , por la composición de la orina del humano), y un promedio de 1.3 L de orina que evacua una persona, se estima la concentración de NH_4 :

$$\left(0.8 \frac{g}{L}\right) \left(1.3 \frac{L}{hab * d}\right) (6 hab) \left(\frac{1}{450L} \cdot d\right) \left(1000 \frac{mg}{g}\right) = 13.8 \frac{mg}{L} NH_4$$

la cual está por debajo del valor propuesto por Melcañ y Eddy ($20 mg/L$), por lo que para propósitos de diseño se tomará este último. La constante de la remoción, K_1 , en función de la temperatura se estima con la ecuación (3.19):

$$K_1 = 0.1367(1.15)^{9-10} = 0.1188d^{-1}$$

y el área necesaria para el proceso de nitrificación (ecuación 3.4):

$$A = \frac{\left(0.45 \frac{m^3}{d}\right) \ln\left(\frac{20}{10}\right)}{(0.1188 d^{-1})(0.6 m)(0.65)} = 6.72 m^2$$

El tiempo de residencia para estas dimensiones es (ecuación 3.2):

$$t = \frac{(6.72 m^2)(0.6)(0.65)}{0.45 \frac{m^3}{d}} = 6 d$$

tomando la concentración de nitratos en el afluente como la diferencia entre la concentración de nitrógeno total a la entrada y la salida

$$C_{in} = (20 - 10) = 10 \frac{mg}{L} \quad \text{nitratos en el afluente}$$

y la concentración de nitratos y nitrógeno total (ecuación 3.1), es:

$$C_{out} = (10)e^{-(0.1188)(6)} = 2.4 * 10^{-2} \frac{mg}{L} \quad \text{nitratos en el efluente}$$

$$NTK = 10 + 2.4 * 10^{-2} = 10 \frac{mg}{L} < 10.55 \frac{mg}{L} \quad (\text{valor de norma})$$

El cálculo del área para la remoción de fósforo no se realizó debido a que la cantidad de fósforo en el agua residual según las tablas 4.3 y 4.4, es muy pequeña y el área requerida para su remoción será menor que el área para la remoción de nitrógeno o materia orgánica.

El área requerida para la remoción de nitrógeno es menor que la requerida para la remoción de materia orgánica, por lo tanto el primer dimensionamiento es el que se emplea para diseño

4.2.2 DISEÑO DEL HUMEDAL SFS

Remoción de materia orgánica. Seleccionando arena media como relleno, los valores de n , k_1 , K_2 , se establecen como 0.42, 420 ($m^3/m^2/d$) y 1.84, respectivamente (tabla 3.3) y la profundidad, y , como 0.6 m (tabla 3.4). A partir de estos valores se determina el valor de K_1 para la temperatura mínima promedio en la zona 9°C (ecuación 3.22):

$$K_s = 1.84(1.1)^{2.29} = 0.645d^{-1}$$

El área transversal mínima, A_s , para asegurar el diseño hidráulico se calcula con la ecuación 3.23, con $S = 0.01$ (ver tabla 3.2):

$$A_s = \frac{0.45 \frac{m^3}{d}}{420 \frac{m^3}{m^2} / d * 0.01} = 0.107 m^2$$

de donde la anchura del estanque será:

$$W = \frac{0.107 m^2}{0.6 m} = 0.178 m$$

y para propósitos de diseño se tomará un valor de 0.30m. El área superficial requerida para este diseño (ecuación 3.4), será:

$$A_s = \frac{\left(0.45 \frac{m^3}{d}\right) \ln\left(\frac{220}{20}\right)}{(0.645d^{-1})(0.6m)(0.42)} = 6.64 m^2$$

valor que será redondeado a $6.7 m^2$. El largo de este sistema es:

$$L = \frac{6.7}{0.3} = 22.33 m$$

y el tiempo de retención hidráulico, de la ecuación (3.2):

$$t = \frac{(6.7 m^2)(0.42)(0.6 m)}{0.45 \frac{m^3}{d}} = 3.75 d$$

Continuando con el diseño, se estima el coeficiente global de transferencia de calor, asumiendo una capa de residuos de 15 cm y una capa de 8 cm de arena media que cubra el humedal (ecuación 3.7):

$$U' = \frac{1}{\left(\frac{0.15}{0.05}\right) + \left(\frac{0.08}{1.5}\right) + \left(\frac{0.6}{2}\right)} = 0.30$$

y la diferencia de temperatura (ecuación 3.8), considerando la temperatura ambiente promedio de $11.4^\circ C$:

$$T_s = \frac{(0.3)(86400)(3.75)}{(4215)(1000)(0.6)(0.42)} (11.4 - 9) = 0.2^\circ C$$

y la temperatura del efluente (ec. 3.9):

$$T_e = 11.4 - 0.2 = 11.2^\circ\text{C}$$

Posteriormente se calcula la temperatura promedio del sistema (ecuación 3.10), la cual deberá ser similar a la temperatura promedio de la zona (11.4°C). Esto es:

$$T_m = \frac{11.4 + 11.2}{2} = 11.3^\circ\text{C}$$

Para una mejor distribución, se propone dividir el área en varias celdas:

$$A_c = \frac{6.7\text{m}^2}{10} = 0.67\text{m}^2$$

y el largo resultante de cada celda, resulta ser igual a:

$$L = \frac{(0.67\text{m}^2)}{(0.3\text{m})} = 2.23\text{m}$$

Remoción de Nitrógeno. En este caso la constante K_{NH} , se calcula con la ecuación (3.29):

$$K_{NH} = 0.01854 + (0.3922)(0.65)^{2.1077} = 0.146\text{d}^{-1}$$

y la constante K_T (ec. 3.27):

$$K_T = 0.146(1.15)^{(11.3-10)} = 0.127\text{d}^{-1}$$

El área requerida para la nitrificación y obtención de 10.0mg/L de nitrógeno total en el efluente (ecuación 3.4), es:

$$A_c = \frac{\left(0.45 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \ln\left(\frac{20}{10}\right)}{(0.127\text{d}^{-1})(0.6\text{m})(0.42)} = 9.75\text{m}^2$$

El tiempo de residencia (ec. 3.2), correspondiente es:

$$t = \frac{(9.75\text{m}^2)(0.6\text{m})(0.42)}{0.45 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}} = 5.5\text{d}$$

y la concentración de nitratos y nitrógeno total en el efluente (ecuación 3.1):

$$C_e = (20 - 10)e^{-(11.3)(5.5)} = 4.25 \times 10^{-2} \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$NT = 10 + 4.25 * 10^{-2} = 10 \frac{mg}{L} < 10.55 \frac{mg}{L} \text{ (valor de norma)}$$

Tomando como área $10m^2$, y dividiendo el área en diez celdas iguales:

$$A_c = \frac{10m^2}{10} = 1m^2$$

el largo de cada celda resulta igual a:

$$L = \frac{1}{0.3} = 3.33m$$

Posteriormente se recalcula la diferencia de temperaturas del sistema y compara con la temperatura de diseño:

$$T_c = \frac{(0.3)(86400)(5.5)}{(4215)(1000)(0.6)(0.42)} (11.4 - 9) = 0.3^\circ C$$

de donde la temperatura del efluente es:

$$T_e = 11.4 - 0.3 = 11.1^\circ C$$

y la temperatura promedio del sistema:

$$T_m = \frac{11.4 + 11.1}{2} = 11.2^\circ C$$

la cual, al compararse con la temperatura inicialmente propuesta ($11.4^\circ C$), resulta ser similar, aceptándose por tanto este diseño.

4.3 DISCUSIÓN GENERAL

En la siguiente tabla se muestran los datos de diseño para los dos sistemas analizados. El valor de diseño elegido para cada tipo de humedal corresponde a la mayor área superficial. Esto es, para el sistema FWS el área de diseño es $12m^2$ y para el sistema SFS, $9.75m^2$.

Tabla 4.5 Resultados

Tipo de humedal	DBO ₅ efluente (mg/L)	A _d área superficial (m ²)	NT efluente (mg/L)	A _d área superficial (m ²)
FWS	20	12.0	10	6.72
SFS	20	6.7	10	9.75

TESIS CON
FALLA DE ORDEN

Los siguientes esquemas (figuras 4.10 a 4.13), muestran los perfiles para ambos sistemas. El SFS que resultó el más recomendable por las ventajas mencionadas, esta constituido por 10 canales de 0.3m de ancho, 3.33m de largo, y profundidad de 0.6m: cuenta con una pendiente de 0.01 y una plancha de cemento concreto pobre de 5 cm para evitar las posibles infiltraciones, las paredes serán construidas con tabique de 7x14x28 en unidades en hileras, por la cara mas angosta, con cemento mortero, utilizando grava en la entrada y salida para mejorar la distribución del agua.

Figura 4.10 Vista de perfil del humedal FWS

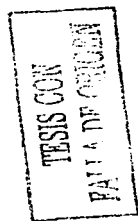


Figura 4.11 Vista superior del humedal FWS



Figura 4.12 Vista de perfil del humedal SFS

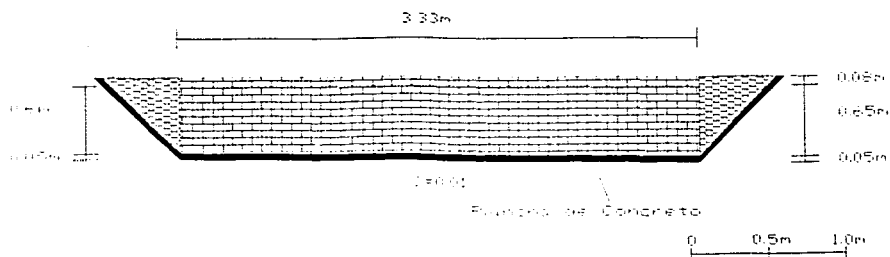
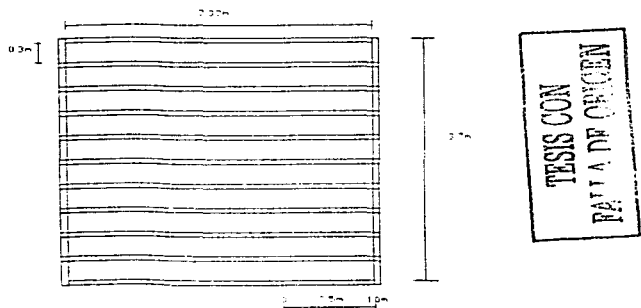


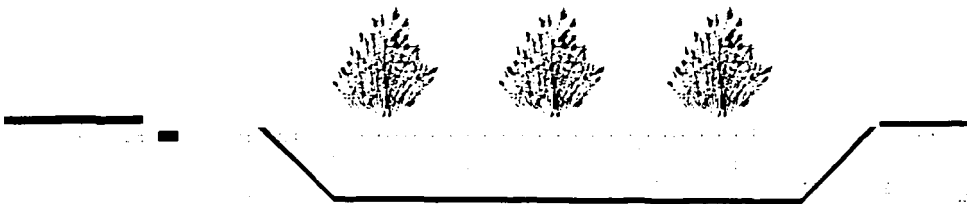
Figura 4.13 Vista superior del humedal SFS



Considerando las características predominantes de los asentamientos, el sistema sub-superficial SFS presenta mejores condiciones de operación, con respecto al sistema de flujo libre FWS, por requerir menor área superficial y ser más resistente a los cambios de temperatura. Además la capa superior de arena, de 8cm, evita la aparición de malos olores e

insectos y, al no existir contacto con las aguas residuales en tratamiento, se disminuye el riesgo de contagio de enfermedades (sin embargo, se debe mencionar que el sistema SFS es más costoso que el FWS, por utilizar un medio filtrante). El arreglo final de estos sistemas, acondicionando las letrinas existentes como posible pretratamiento, se muestran a continuación:

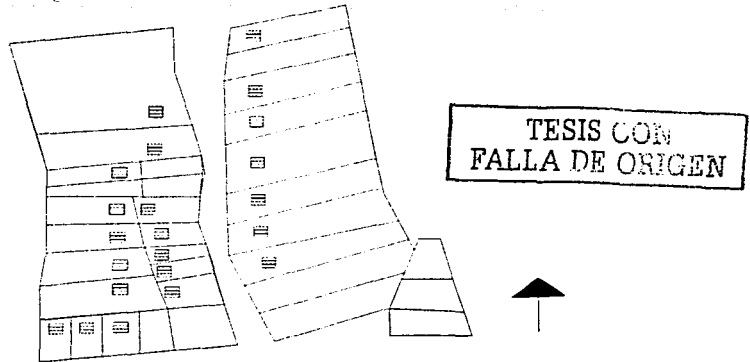
Figura 4.14 Arreglo final de humedales SFS



La distribución de los humedales dentro del asentamiento de Estrella Mora se muestra en la figura 4.15. Debe recordarse que actualmente existen 10 lotes que se encuentran sin habitar, de los cuales 9 cuentan con el espacio necesario para la construcción de humedales. Para los lote que no cuentan con espacio (once), se recomienda la instalación de un sistema de baño seco y fosa séptica para el manejo y disposición de sus aguas residuales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.15 Distribución de humedales en Estrella Mora



La distribución de los humedales en el asentamiento de Subestación Eléctrica, se muestra en la figura 4.16, encontrándose que solo un lote no cuenta con el espacio necesario para la instalación de un humedal.

4.3.1 COSTOS

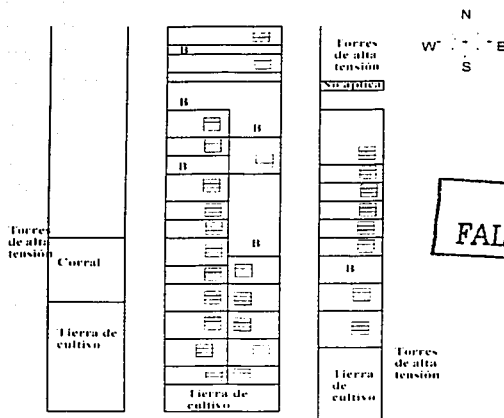
En la tabla 4.6 se presentan los costos correspondientes a la construcción del sistema SFS seleccionado, considerando las dimensiones calculadas en el punto 4.3.2 y el acondicionamiento de las instalaciones actuales como sistemas de pretratamiento.

El costo de cada humedal asciende a 2.320 pesos, lo cual corresponde a un total de 51.040 pesos para la instalación de 22 humedales en Estrella Mora y 64.960 pesos para los 28 lotes habitados de Subestación Eléctrica.

Como se mencionó anteriormente, este costo es ligeramente superior al de los humedales FWS (1.600 pesos por cada sistema), sin embargo sus características de diseño y operación los convierte en la opción más viable. Comparando el costo de humedales contra los

correspondientes a los otros sistemas de tratamiento disponibles (ver capítulo 2), resultan menores.

Figura 4.16 Distribución de humedales en Subestación Eléctrica



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.6 Costos de la instalación de humedal artificial tipo SFS.

Material	Unidad	Cantidad	Costo	Total
Excavación manual en material común (zanjas de hasta 2 metros)	m ³	9,7	\$50	\$485
Ladrillo (7x14x28 cm.)	Pieza	600	\$0,7	\$420
Arena media	m ³	7	\$107,25	\$750
Cemento mortero (bulto 50 Kg.)	Bulto	2	\$45,5	\$91
Cemento concreto (bulto 50 Kg.)	Bulto	1	\$70	\$70
Codo 90° PVC (2")	Pieza	2	\$15,9	\$32
Tubo PVC (2")	Pieza	2	\$18,5	\$37
Union T° PVC (2")	Pieza	8	\$17,0	\$136
Vegetación garzo	Lote	1	\$100	\$100
Acondicionamiento de letrina como sistema de pretratamiento	Pieza	1	\$300	\$300
			TOTAL	\$2320

Las fosas sépticas prefabricadas tienen un costo de 11,033.00 pesos por unidad, mientras que la instalación de baños secos (para reducir el volumen de agua residual, hasta en un 40%), tiene un costo de 8,000.00 pesos, si se elaboran de fibra de vidrio, o de 3,642.00 pesos cuando se emplean materiales económicos, como madera o perfiles metálicos con láminas de cartón (el desglose de los costos se presenta en el anexo).

4.4.2 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

Para obtener resultados satisfactorios de un humedal, debe seguirse un plan de mantenimiento que garantiza la eficiencia en el tratamiento mediante:

- la conservación del área máxima de contacto entre el agua, la comunidad microbiana, la capa de residuos de vegetación y el sedimento.
- la distribución del flujo hacia todas y cada una de las partes del humedal.
- el mantenimiento de un ambiente saludable para los microbios y
- el cuidado de los vegetales para mantener su crecimiento.

La tabla (4.10), resume las acciones del programa de mantenimiento necesario para el sistema de humedales SFS propuesto.

Tabla 4.10 Programa de mantenimiento

Aspecto	Actividad
Hidrología	<ul style="list-style-type: none"> • Para evitar olores y formación de mosquitos, no debe permitirse el desarrollo de flujo en la superficie. • En caso de presentarse flujo superficial, regular el flujo con ayuda de la válvula de entrada. • El agua debe cubrir todas las partes del humedal, y estar en movimiento a través de todas las partes del mismo. • Evitar áreas de estancamiento.
Estructuras	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeccionar diques, vertederos y estructuras de control de agua, periódicamente e inmediatamente después de cualquier anomalía en el flujo. • Verificar principalmente estructuras de salidas, después de precipitaciones importantes.
Vegetación	<ul style="list-style-type: none"> • No exceder los límites de tolerancia (nivel de agua), de las especies usadas durante periodos largos de tiempo. • La profundidad del agua puede aumentarse en los meses fríos, aumentando también los tiempos de retención. • Quitar especies invasoras.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

	<ul style="list-style-type: none"> • Dado que pueden dañar severamente la vegetación emergente, los herbicidas no deben usarse excepto en circunstancias extremas. • Las ratas y otros roedores pueden dañar los diques y la impermeabilización, por lo que deben tomarse medidas para evitar su proliferación (se sugiere instalar una pantalla de alambre).
Ratas	

Así como en los humedales naturales, la vegetación del humedal artificial está sujeta a cambios estacionales; siendo recomendable mantener registro para identificar los ciclos de cambios vegetativos y sustituir oportunamente las especies antes de que mueran.

La acumulación de sedimento, así como la capa de residuos, disminuye la capacidad de almacenamiento de agua, afecta la profundidad útil del humedal y altera los caminos de flujo. Por lo tanto, los sedimentos, la capa de residuos y la profundidad del agua deben verificarse periódicamente (se recomienda hacerlo cada 2 meses).

TESIS CON
 FALTA DE COPIAS

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ante el grave impacto ambiental al suelo y subsuelo, provocado por la descarga de aguas residuales de asentamientos humanos que no cuentan con sistemas de drenaje, se hace indispensable el empleo de sistemas alternos que reduzcan la carga contaminante de estas descargas.

En el presente trabajo se abordó esta problemática, planteando la posibilidad de emplear *humedales artificiales* como sistema de tratamiento de aguas residuales en asentamientos irregulares que no cuenten con alcantarillado y que por sus condiciones geográficas y económicas no sean candidatos inmediatos a la construcción de una red formal.

La metodología desarrollada para la selección y diseño de humedales, SFS y FWS, es aplicable en asentamientos rurales, semiurbanos y urbanos en los cuales sea necesario, o se desee, dar tratamiento al agua residual antes de su descarga. El tratamiento propuesto remueve principalmente materia orgánica, nitrógeno y fósforo, pudiendo llegar a valores por debajo de las normas de descarga.

Para la instalación de humedales artificiales, se establece como condicionante que el sitio de instalación posea topografía uniforme horizontal o en ligera pendiente, exista terreno disponible (aproximadamente 15 m² por vivienda) y la población beneficiada cumpla con el programa de mantenimiento propuesto.

El diseño de humedales artificiales en una zona de la Delegación Tlalpan de la Ciudad de México, específicamente en los asentamientos de Estrella Mora y Subestación eléctrica en *San Miguel Topilejo*, demuestran la viabilidad de aplicación de humedales artificiales como un método de tratamiento y disposición de las aguas residuales generadas en asentamientos irregulares.

Mediante la determinación de las dimensiones requeridas para los sistemas de humedales propuestos, la selección del tipo de humedal más conveniente y su vegetación, así como la identificación de la distribución de los mismos dentro de los asentamientos de estudio y la comparación de su costo contra otros sistemas para el manejo y disposición del agua

residual, permite asegurar que esta es una alternativa recomendable, tanto o más que las fosas sépticas.

Finalmente, atendiendo a las observaciones realizadas durante el trabajo de campo que acompañó la caracterización de la zona de estudio y las características de la población encuestada, se recomienda:

- Enfocar el programa de instalación de humedales artificiales, no solamente como una medida de protección al ambiente, sino como una forma de reducir los requerimientos de agua de una vivienda al acondicionar el agua residual para su reaprovechamiento
- Realizar campañas informativas que aseguren contar con la aceptación de la población, captar su interés en la participación y colaboración para la mejora del ambiente y utilización adecuada de humedales artificiales
- Diseñar y distribuir folletos explicativos que muestren las ventajas que trae el uso de humedales y los aspectos prácticos de su funcionamiento
- Proporcionar ayuda técnica para la construcción de humedales, principalmente para la selección del sitio, colocación de tubería y vegetación, y etapa de arranque.
- Elaborar manuales *prácticos y suficientemente claros*, para la realización del mantenimiento de los humedales y su protección para cuando se presenten condiciones irregulares de operación: descargas por encima o por debajo de las de diseño, reducción de la temperatura ambiente, etc

De estas recomendaciones y la descripción de los asentamientos irregulares presentadas en este trabajo, es posible concluir que la descarga de aguas residuales, además de ser un problema ambiental que requiere de soluciones técnicamente viables, es el resultado de un problema social que, desafortunadamente, existe a lo largo y ancho de nuestro país. De aquí que la solución presentada atiende la situación económica de los asentamientos de estudio, la necesidad de la población por aumentar su dotación de agua y las características de terreno que permite la construcción de humedales y se vería favorecida, desde el punto de vista estético, con la construcción de estos

Al haberse realizado este trabajo dentro de un programa institucional: Programa Parcial de Desarrollo para la Delegación de Tlalpan, la probabilidad de construcción de humedales en

San Miguel Topilejo se considera muy alta, por lo que se estima que en un par de años se contará con datos suficientes para establecer la eficiencia de los diseños aquí propuestos.

ANEXO

A.1. DESGLOSE DE COSTOS

Tabla A.1.1 Costos de la instalación de humedal artificial tipo SFS

Material	Unidad	Cantidad	Costo	Total
Excavación manual en material común en zanjas hasta una profundidad de 0 a 2.00 metros	m ³	9.7	\$50	\$485
Tabique 7x14x28 cm	Pieza	600	\$0.7	\$420
Arcilla media	m ³	7	\$107.25	\$750
Cemento mortero (bulto 50 kg.)	Bulto	2	\$45.5	\$91
Cemento concreto (bulto 50 kg.)	Bulto	1	\$70	\$70
Codo PVC 90° 2"	Pieza	2	\$15.9	\$32
Tubo PVC 2"	Pieza	2	\$18.5	\$37
T PVC 2"	Pieza	8	\$17.0	\$136
Vegetación carrizo	Lote	1	\$100	\$100
Acondicionamiento de letrina como sistema de tratamiento	Pieza	1	\$300	\$300
			TOTAL	\$2320

Tabla A.1.2 Costos de la instalación de fosas sépticas prefabricadas

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
Excavación con equipo para zanjas en material común-seco de 0.00 a 2.00 metros de profundidad	m ³	6.00	250.00	1,500.00
Plantilla apisonada al 85% Proctor en zanjas, con material producto de banco	m ³	0.80	84.78	67.82
Acondicionamiento de letrinas existentes como pozos de absorción	Pieza	1.00*	500.00	500.00
Suministro de fosas sépticas con capacidad de hasta 10 habitantes	Pieza	1.00	4,045.00	4,045.00
Instalación de fosa prefabricada	Pieza	1.00	2,228.05	2,228.05
Relleno en zanjas a volco con material producto de la excavación	m ³	0.72	18.00	12.96
Completado al 85% Proctor, con material de banco	m ³	0.48	71.90	34.51
Suministro y fabricación de fosa tapa de 15 cm. de concreto armado 1'c ² : 250 kg/cm ²	m ²	4.00	450.00	1,800.00
Carga y relleno de material producto de la excavación	m ³	5.28	160.00	844.80
			TOTAL	11,033.15

*Con el entendido que todos los predios cuentan ya con alguna excavación

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Tabla A.1.3 Costos de la instalación de baños secos con cámaras subterráneas

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
Excavación con equipo en material común-seco hasta 2,00 metros de profundidad, incluye equipo	m ³	5,00	250,00	1.250,00
Carga y acarreo de material producto de la excavación	m ³	5,00	160,00	800,00
Suministro y colocación de sanitario comportero (baño seco) con separación de orina, casetta y cámaras construidas a base de fibra de vidrio o plástico rotomoldeado	Pieza	1,00	5.200,00	5.200,00
TOTAL				7.250,00

Tabla A.1.4 Costos de la construcción de baños secos (con materiales económicos)

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
Excavación a mano hasta 2,00 metros de profundidad	m ³	2,00	40,21	80,42
Plantilla apisonada al 85% Proctor en zanjas, con material producto de banco	m ³	0,20	51,64	10,33
Muro de fabriche de 14 cm de espesor	m ²	7,00*	160,60	1.124,20
Fabricación y colado de concreto vibrado y curado de f'c = 200 kg/cm ²	m ³	0,40	1.388,32	555,33
Lamina de asbesto de 2,44 x 1,00	Pieza	5,00	157,39	412,17
Puerta de lamina No. 18	Pieza	1,00	796,94	796,94
Mueble de baño seco	Pieza	1,00	342,62	342,62
Carga y acarreo de material producto de la excavación	m ³	2,00	160,00	320,00
TOTAL				3.642,00

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

BIBLIOGRAFIA

- Abel Domínguez R. La ciencia ecológica. 2 agosto 2002
http://www.iespana.es/natureduca/cienc_ciclo_hidro.htm
- Aguamarket. Hechos y cifras del agua. 24 octubre 2002
http://aguamarket.com/temas_interes/038.asp
- Aguirre Saldivar, Rina, et al. PMIC San Miguel Topilejo Programa de Manejo Integral de Contaminantes Informe final. Sección de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería. UNAM 2002
- Athie, M. Calidad y cantidad del agua en México. Universo Veintiuno, México, 1987.
- CNA 2000. Manual de diseño de alcantarillado . 2000.
- Convención de Ramsar. Convención sobre los Humedales. 21 diciembre 2000
http://www.ramsar.org/values_waterpurification_s.htm
- Córdova, A. Programas de saneamiento seco a gran escala. Observaciones y recomendaciones preliminares de experiencias urbanas en México. Human Dimensions Research Unit, Department of Natural Resources, Cornell University, Ithaca, N.Y. Mayo 2001.
- EPA. Desig Manual Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. Center for Environmental Research Information Cincinnati. E U A 1988
- Facultad de Ingeniería. Manual de normas de proyecto para obras de aprovisionamiento de agua potable en localidades urbanas de la República

Mexicana. Departamento de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 1979.

- Fenoglio Limon Francisco Enrico Tesis Licenciatura. Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedal artificial de flujo vertical. 2000.
- Hammer, Donal A. Creating freshwater wetlands. Lewis Publishers. E.U.A. 1992.
- Henry, J.G. y Heinke, G. W. Ingeniería Ambiental. Editorial Pearson. México. 1999.
- INEGI. Cuaderno delegacional Tlalpa. México. 2000.
- ITESM. Proyecto de Manejo Integral de Aguas Residuales en el ITESM Campus Hidalgo
www.itesm.proyectodemanejointegraldeaguasresidualesenelITESMCampusHidalgo.htm Diciembre 2002.
- Jarabo Friedrich, Francisco. Elortegui Escarpín, Nicolás y Jarabo Uzcátegui, Jenny. Fundamentos de Tecnología Ambiental. Editorial S.A.P.T. España. 2000.
- Jiménez Tovar Balam Jesús. Tesis licenciatura. Construcción y arranque de una planta de tratamiento de aguas residuales tipo humedal artificial de flujo horizontal. 1999.
- Kadlec, Robert H y Knight, Robert L. Treatment Wetlands. Lewis Publishers. E U A. 1996.
- Lara, J. A. Tesis de maestría. Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales. Cataluña, España. 1999.

<http://looneytunes.acmecity.com/gossamer/111/index.htm>

- López Ruiz, Rafael. Apuntes de tratamiento de aguas residuales. Facultad de Ingeniería. UNAM. México. 2000.
- Metcalf & Eddy, Inc. Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Vol. I. Editorial Mc Graw Hill. México. 1996.
- Metcalf y Eddy. Wastewater Engineering, treatment, disposal reuse. Ediciones Mc Graw Hill USA. 1991.
- NOM-001-ECOL-1996 Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
- NOM-002-ECOL-1996 Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998.
- NOM-003-ECOL-1997. Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.
- NOM-006-CNA-1997. Norma Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997, Fosas sépticas prefabricadas-especificaciones y métodos de prueba. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de enero de 1999.
- NOM-127-SSA1-1994. Norma oficial Mexicana NOM -127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y

tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 1996.

- NOM-180-SSA1-1998. Norma oficial Mexicana NOM-180-SSA1-1998. Salud ambiental: Agua para uso y consumo humano. Equipos de tratamiento de tipo doméstico. Requisitos sanitarios.
- Schreingart, M. y d'Andrea, L. Servicios urbanos, gestión local y medio ambiente. Editado por El Colegio de México CE. R. FE. México. 1991.
- Senamhi. Aprendiendo Hidrología. 2 agosto 2002.
http://www.senamhi.gob.pe/aprendiendo/apren_hidro.htm
- Seoáñez, M. 1999. Aguas residuales tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnologías. Diseño. España. Ediciones mundi-prensa.
- Seoáñez Calvo, Mariano. Ingeniería del medio ambiente Aplicada al medio natural continental. Ediciones Mundi-Prensa. Segunda edición. España. 1999.
- Tlalpan. Cuaderno Estadístico Delegacional. Delegación de Tlalpan del Gobierno del Distrito Federal. 2000.
- Tlalpan. Diagnóstico de San Miguel Topilejo Casco Urbano – Asentamientos Irregulares. Delegación de Tlalpan del Gobierno del Distrito Federal. Reporte interno (circulación restringida) 2001.
- <http://agpublications.tamu.edu/pubs/eng/15230s.pdf>
- <http://www.ite.mx/paginaverde/TECNOLOGIA/humedales.htm>
- <http://www.gem.es-materiales/document/document/g01/d01203/d01203.htm>

- LOS HUMEDALES ARTIFICIALES COMO TRATAMIENTO TERCIARIO DE BAJA COSTO EN LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES URBANAS

- http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/fresh_water_surface_wetlands.pdf
- http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/wetlands-subsurface_flow.pdf